

상호 대국의 안테나 간 자동 추적 지향 기법 및 장치 연구

김학인^{*,1)} · 조성훈¹⁾ · 이종효¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

The Study of an Automatic Tracking and Pointing Method and the Regarding System for Facing Two Antennas

Hak In Gimm^{*,1)} · Sung Hoon Cho¹⁾ · Chong Hyo Lee¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 28 January 2015 / Revised 26 August 2015 / Accepted 25 September 2015)

ABSTRACT

The existing mobile antenna networks in the military use have been operated by the manual pointing between two antennas. The work presented here describes the study of ATPC(Automatic Tracking and Pointing Control) system between facing antennas and the related tracking and pointing performances. This system is able to automatically track the maximum RSSI(Received Signal Strength Indication) value from the source's RF(Radio Frequency) signal and then control for maintaining the LOS(Line of Sight) between two antennas. The system has three major units; the driving unit consisting of motors, harmonic drives and encoders, the sensor unit with a GPS(Global Positioning System) and AHRS(Attitude and Heading Reference System) and the control unit regulating all the tracking and pointing events. By using PI(Proportional and Integral) controller, this system is able to properly track and point the other antenna under the external disturbance like the wind load. Both the simulation and the experimental works have been successively carried out to prove the performances of the system.

Key Words : Antenna(안테나), External Disturbance(외란), Pointing(정렬), Received Signal Strength Indication(수신전파 신호강도), Tracking(추적)

1. 서론

안테나 통신 기술에서 추적과 정렬 분야는 국내외에 걸쳐 상당한 연구가 이루어진 분야이지만 새로운 기술

의 진행에 따라 향후에도 지속 적으로 발전 할 수 있는 분야이다. 마찬가지로 국내에서도 특히 군사용 이동 통신기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다^{1,2)}.

기존 군에서 사용 중인 이동 원격 운용 안테나 시스템은 이동 마스트 상단에 탑재되며, 안테나 간 LOS 정렬은 각 사이트의 운용 병에 의해 수동으로 조작하여

* Corresponding author, E-mail: mazeblue@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

맞춘다. 이와 같은 방식은 통신 네트워크를 운용하는데 상당한 준비와 시간이 필요하게 된다.

따라서 이러한 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 제안된 추적이론^[3-7]을 기초로, 원격 운용 안테나 간 신속한 위치 확인, 바람과 같은 외란조건에서도 상호 대국하는 안테나의 RF 신호 추적과 안정적인 LOS 유지 기술을 적용한 ATPC 시스템을 연구하여 이에 대한 성능을 분석하였다. ATPC 시스템의 주요 구성은 제어 유닛, 센서 유닛, 구동을 위한 구동 유닛으로 구성되며 보다 구체적인 내용은 다음 장에 설명하였다.

또한 ATPC 시스템은 다양한 주파수 밴드에서 통신 네트워크가 가능하도록 하여 L 밴드 주파수와 C 밴드 주파수 대역의 안테나를 사용할 수 있도록 연구되었다. 본 논문에서는 Table 1에 제시된 C 밴드 안테나를 사용한 ATPC 시스템의 자동지향, 추적, 정렬 뿐 아니라 외란 환경에서도 안정적인 정렬 유지의 성능분석 결과를 제시하였다.

Table 1. C-band antenna specifications

Title	Contents	Remark
Frequency range	4 ~ 8 GHz	
Polarization	Lateral/ Vertical in dual	
Diameter	0.7 m	
Beam-width	3°	
Gain	29 dBi	
1st Side Lobe Level	-13 dBc	

2. 안테나 추적 정렬 및 안정화 기법

2.1 안테나 추적방법

네트워크 통신을 위해 상호 마주보는 두 안테나에 대해 한편은 마스터(Master)로 다른 안테나는 슬레이브(Slave)로 구분한다. Fig. 1을 참고로 안테나는 각 위치에서 GPS 신호로 상호 거리 계산, 자세 방위각 센서인 AHRS 센서에 의해 안테나 간 지향 방향을 감지한다. 이와 같은 정보를 통해 각 안테나는 상호 정렬하기 위한 목표(Target) 방향을 찾게 된다.

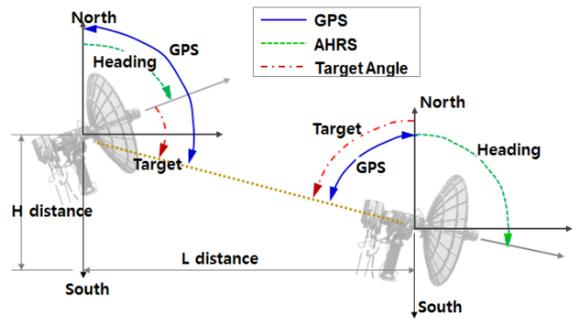


Fig. 1. Scheme of finding antenna direction

상호 정렬하기 위해선 처음에 마스터 안테나는 슬레이브 안테나의 GPS 정보를 통해 슬레이브 방향으로 향하고, 이어 슬레이브 안테나 역시 마스터 안테나의 GPS 위치 정보에 의해 마스터 안테나 위치를 확인한다. Fig. 2는 이격된 마스터 안테나와 슬레이브 안테나 간 상호 순차적으로 추적과 정렬하는 과정을 설명한다. 순차적인 추적방법을 택한 이유는 상호 동시 추적에서 발생할 수 있는 혼돈을 막기 위함이다.

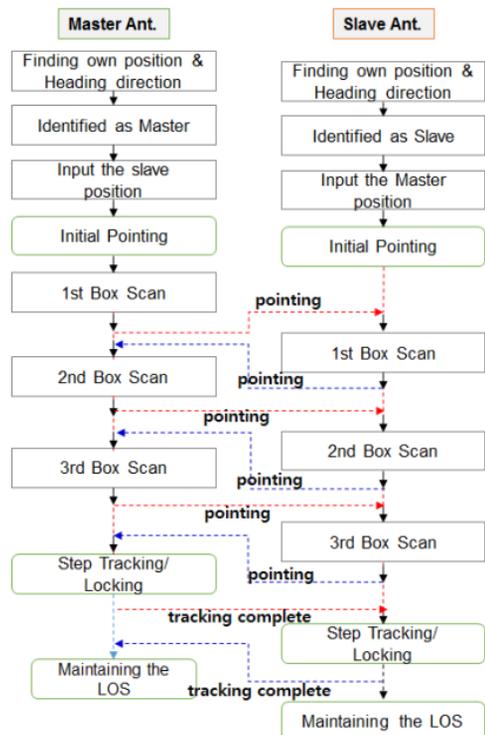


Fig. 2. Scheme of tracking & pointing process between facing antennas

이와 같이 순차적으로 상호 추적하는 각 단계별로 확보된 추적 정보는 안테나 위치와 지향정보와 함께 통신 시스템 전체를 통제하는 제어관리 시스템으로 무선 전송되어 관리된다.

Fig. 2에서 설명된 단계별 추적 과정은 앞서 Fig. 1에서 언급한 바와 같이 초기 상호 지향 방향을 확인한 후 마스터 안테나와 슬레이브 안테나 간의 1차 박스(Box Scan) 스캔을 시작하여 지향 범위 내에서 송수신 RF 에너지 분포를 살펴게 된다. 적정한 최고 RSSI 값을 추적하기 위해 3회 정도의 박스 스캔을 반복하면서 최고 RSSI 값을 지향하는 위치로 추적점이 더욱 접근하게 된다. 마지막 3번째 박스 스캔이 종료되면 추적 과정에서 확인된 최고 RSSI 값을 가진 추적 점으로부터 스텝추적이 시작된다. 이때는 박스 스캔보다 작은 스텝 크기가 사용된다. 최종적으로 최고 RSSI 값을 찾게 되면 안테나 간 LOS 상에서 정렬하게 된다.

2.2 박스 스캔 방법

앞서 설명한바와 같이 안테나 간에 초기지향이 이루어지면 박스 스캔과 스텝 추적 과정을 거쳐 최고 RSSI 값의 위치를 찾게 된다. 추적의 첫 단계인 박스 스캔은 Fig. 3과 같이 이루어진다. 즉, 초기 시작점 A로부터 특정한 고각과 방위각 범위에서 스캔하여 최고점(그림의 C점)을 식별 후 이 위치는 다음 추적을 위한 시작점이 된다. 이때 스텝 크기는 본 연구의 경우 2°이다.

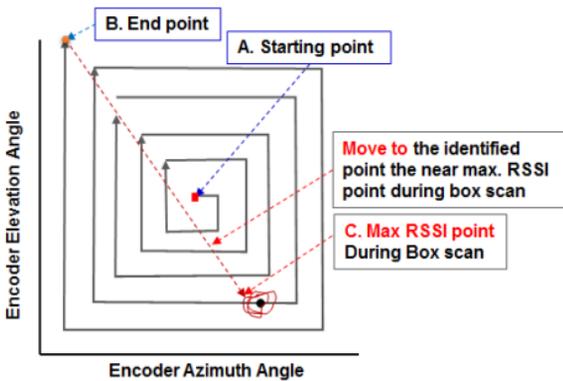


Fig. 3. Scheme of box scanning

박스 스캔 범위와 스텝 크기는 사용된 GPS 센서의 위치 오차, AHRS 오차, 엔코더 오차, 조립 오차, 방위각과 고각 기준 설정 오차와 상대 안테나 위치에 대한

입력 오차를 고려하여 정의된다. 그 결과 ATPC 시스템은 1 km 거리에서 방위각과 고각에서 각각 9°와 3° 수준의 오차가 있음을 계산과 실험으로 확인하였다. 따라서 실제 통신 거리가 1 km 이상이므로 초기 박스 스캔을 위한 방위각 범위는 ±10°와 고각 범위는 ±5°로 설정하였다.

추적 요구 시간과 운용 안테나의 빔 폭을 고려하여 스텝 크기는 박스 스캔의 경우 2°로 정하였다. 물론 스텝 크기가 작을수록 좀 더 세밀한 추적이 가능하나 상대적으로 추적 시간 증가는 필연적이다.

사용된 C 밴드 안테나의 방위각 RF 빔 패턴은 Fig. 4와 같으며, 박스 스캔 추적 위치가 방위각 +10°이고 스텝 크기 2°를 사용하면 최고 RSSI 값 대비 -4.5 dBm의 위치를 추적할 수 있다. 고각에 대해서도 같은 논리로 결정하였다. 이러한 방식으로 박스 스캔을 3회 진행하면 최고점 근처에서 박스 스캔이 종료되고 스텝 추적이 시작된다.

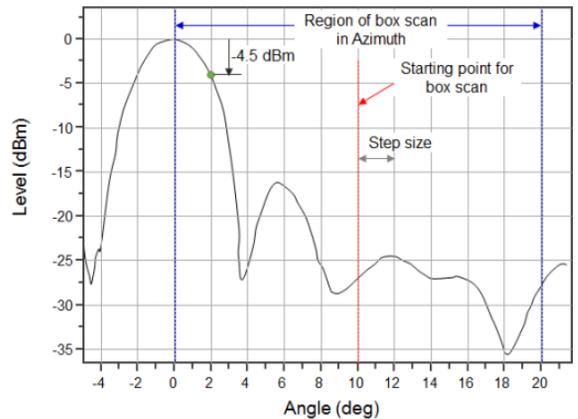


Fig. 4. Determination of the step size for box scan

2.3 스텝 추적 방법

스텝 추적의 이론과 기법은 특히 위성 통신 등에서 중요하게 사용된다. 국내 군용 육상 안테나에 대한 연구는 Gimm^[1,2] 등에 의해 수행된바 있으며 추적 알고리즘에 관한 연구는 Tom^[7] 등 많은 연구가 이루어져 왔다. 이에 ATPC 시스템은 스텝 추적 기법을 이용하여 박스 스캔 종료 후 박스 스캔에서 보다 작은 스텝 크기를 사용한 스텝 추적으로 최고 RSSI 값을 찾는다.

앞서 Fig. 3과 Fig. 4에서 설명한 박스 스캔 방식으로 스텝 추적 단계에서는 방위각과 고각에서 스텝 크기를 0.2°로 수행한다. 이 크기는 더 작거나 크게 조

정할 수 있다. 이 역시 추적 요구 시간과 안테나의 빔 폭을 고려하여 정의하였다. 특히 본 논문에서 C 밴드 안테나의 빔 폭이 3° 임을 고려할 때 Ménez^[8]에 의해 제안된 빔 폭의 1/10 수준을 고려하여 0.2°로 정의하였다.

본 논문에서 스텝 추적 과정은 산술평균을 이용하는데 예를 들어 Fig. 5에서와 같이 박스 스캔 최종 위치인 경로 1로부터 경로 2, 경로 3과 경로 4를 경유하여 경로 5까지 0.2°씩 이동한다. 이때 경로 상 RSSI 값을 비교하여 수평에서 “경로 2 > 경로4”이고 수직에서 “경로 5 > 경로 3”으로 판정되면 새로이 확인된 RSSI 값 최고점으로부터 우측 및 상향으로 다음 추적을 진행한다.

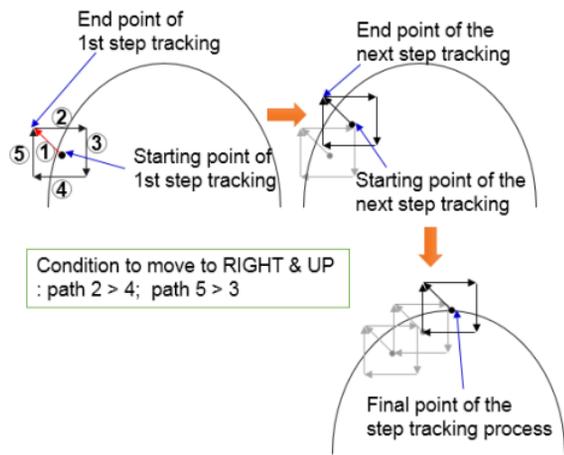


Fig. 5. General scheme of step track for the max. RSSI value

이와 같이 최고 RSSI 값을 가진 위치가 확인 되면 각 안테나는 그 위치를 지향 정렬 한 후 유지모드 상태가 된다. 유지모드에서는 ATPC 시스템의 고각과 방위각 구동 모터 브레이크가 작동하여 정지(Parking) 상태가 된다. 이때 만일 외란이 작용하거나 마스트 지지선(Guy) 풀림 등으로 인해 안테나 간 정렬 유지선이 안테나 빔 패턴 정점으로부터 5° 이상 벗어나면 엔코더와 AHRS 센서는 상태 변화를 감지하여 모터 브레이크를 해제시키고 안테나 간 재 추적과 재 정렬을 수행한다. 이는 빔의 정점으로부터 5° 이내에선 C 밴드 안테나의 경우 통신 품질 저하가 심각하지 않다. 또한 이러한 재추적과 정렬 기준 설정으로 구동부의 운용 수명 개선이 기대된다.

2.4 ATPC 하드웨어 설계

Fig. 6은 ATPC 시스템의 구성도로서 전원장치, 모터, 감속기와 엔코더를 포함하는 구동 유니트, 정렬유지 장치의 거동을 제어하는 제어 유니트와 GPS 및 AHRS 센서로 구성된 센서 유니트로 구성된다. 엔코더와 AHRS 센서는 제어기의 피드백(Feedback) 기능으로 상호 마주보는 안테나 간 자동지향과 정렬 뿐 아니라 지진 폴립이나 바람 등의 외란에 의한 상태 변화를 감지하여 모터 구동과 제어 기능에 관여한다.

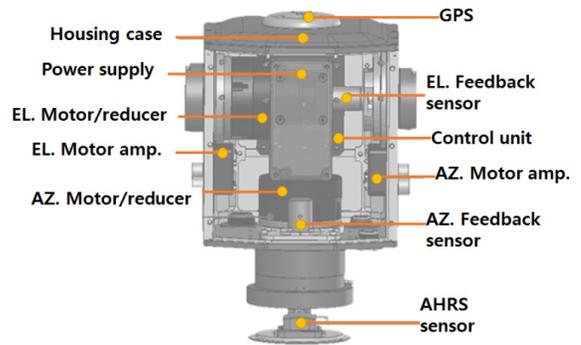


Fig. 6. ATPC's major components

Fig. 7은 정렬유지 장치를 구성하는 각 유니트 간 인터페이스 관계를 나타내며 전체 네트워크 시스템의 제어관리를 담당하는 주 통신 시스템과 안테나는 본 논문에선 배제되었다.

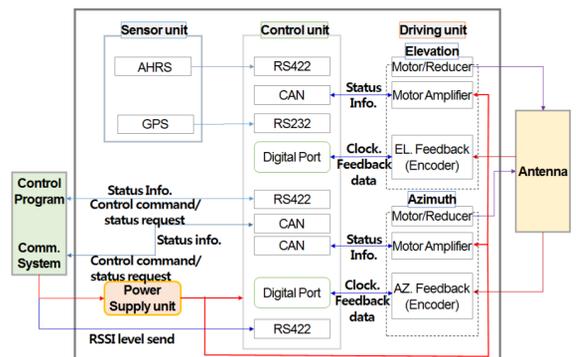


Fig. 7. Interface environment between the components

추적 정렬장치와 안테나 통신 시스템은 RS422와 CAN 통신으로 연결되며 중앙 전원장치로부터 DC48 Volt의 전원을 사용하며 ATPC 시스템 내부 전원공급 장치에 의해 DC24 Volt로 변조된다. 또한 GPS는

RS232로 통신되며 엔코더로부터 고각 및 방위각의 피드백 신호는 디지털 SSI(Simple Sensor Interface) 포트로 정보를 주고받는다.

각 안테나 위치에 설치된 AHRS 센서는 각각의 안테나 방향과 마스트 움직임 상태를 RSS422 통신을 통해 ATPC 시스템의 제어 유니트로 전달한다. 또한 제어 유니트는 중앙 장치로부터 안테나 간 RSSI 값 정보를 RS422 통신으로 받는다. 제어 유니트는 이상의 모든 정보를 취합하여 ATPC 시스템의 현 상태와 각도 이동 명령을 제어한다. 이러한 ATPC 시스템의 성능과 실험 연구를 다음과 같이 수행하였다.

3. 안테나 추적 정렬 실험연구

추적 정렬 시뮬레이션과 실험은 두 가지 상황을 고려하여 수행되었다. 첫 번째 실험은 MODE-I으로 불리며 ATPC 시스템이 Fig. 2에 제시된 절차대로 양방향 안테나 간 지향, 추적 및 정렬 절차가 정상적으로 운용되고 작동되는지 확인하였다. 이때 실험은 안테나 간 거리가 45 m인 옥외에서 이루어졌다. 두 번째 실험 방식은 MODE-II이며 안테나 간 거리가 MODE-I에 비해 상대적으로 먼 1.2 km인 옥외 장소에서 실험하였다. 특히 특정 외란 조건을 적용하여 시스템의 추적 정렬 기능 검증과 성능을 분석하였다. 외란은 마스터 안테나를 6 자유도 움직임이 가능한 모션 시뮬레이터(Motion simulator)를 이용하여 제공되었다.

3.1 단거리 이격 안테나 추적 정렬 알고리즘 검증

C 밴드 안테나를 이용한 MODE-I 실험을 위해 Fig. 8과 같이 장치를 구성하여 Fig. 9의 장면과 같이 배치하였다. 이때 두 안테나의 GPS 위치 정보는 Table 2와 같으며 옥외에 설치된 안테나 간 거리는 45 m로 계산되었다.

Table 2. GPS Information between two antennas for MODE-I test

Content	GPS Information(°)		Distance(m)
	North	East	
Master Ant.	37.3155	126.7901	45
Slave Ant.	37.3151	126.7902	

본 실험 목적은 언급한 바와 같이 Fig. 2에 제시된 절차를 계획대로 수행하는지를 검증하는 것이다.

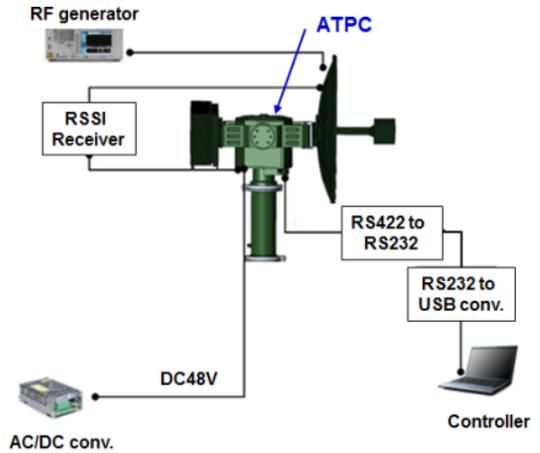


Fig. 8. Test equipment setup for Mode-I and Mode-II

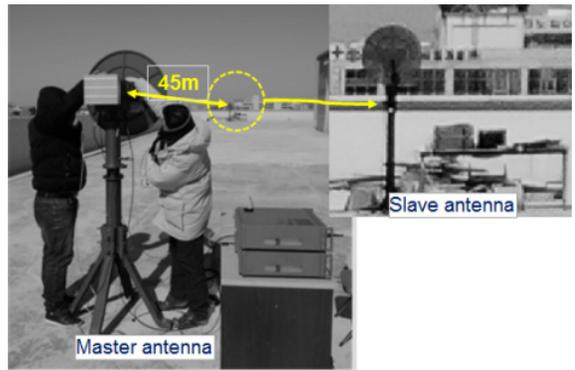


Fig. 9. Experimental test scene for Mode-I using C band antennas

실험은 Fig. 2 절차에 따라 각 안테나는 초기 임의 방향으로부터 초기 지향 방향을 찾고, 추적과 정렬 하도록 계획하였다. Table 3은 MODE-I 실험을 위해 사전에 분석된 현 실험 장소에서 각 안테나가 지향하고 추적해야 할 방위각, 고각과 최고 RSSI 값을 나타낸다.

Table 3에서 표현된 Az(Azimuth)는 방위각, El.(Elevation)은 고각을 나타내며, 방위각은 GPS 기준으로 북쪽을 0°로 하여 시계 방향으로 각도가 증가하고, 고각은 지면에 수평한 안테나 혼(Horn) 위치가 0°이다. 사용된 RSSI 값은 RMS(Root Mean Square)로 계산하며 단위는 dBm이다.

Table 3. The initial heading directions and the target values of RSSI for the antennas

Content	Antenna		Remark
	Master	Slave	
Az. / El. (°)	337.30/ -2.00	164.10/ -3.60	
Max. RSSI(dBm)	-45.00	-47.50	

실험 결과 각 안테나는 초기 임의의 방향으로부터 정량적으로 상호 초기지향 하였고, 이로부터 절차에 따른 박스 스캔과 추적 단계를 거쳐 최고 RSSI 값, 고각과 방위각을 찾아 정렬하였다. 2회의 연속 실험을 통해 그 결과는 Table 4와 Table 5에 제시하였다. Table 4와 Table 5에서 RSSI 단위는 마찬가지로 dBm 이다.

Table 4. The first experimental test result(Mode-I)

Scan Sequence	Results	
	Master	Slave
Initial	Az. 90.0° El. 0.0° RSSI: -85.1(↓40.1)	Az. 270.0° El. 0.0° RSSI: -87.5 (↓40.0)
Box(1st)	Az. 336.3°/EL. -5.1° RSSI -57.3(↓12.3)	Az. 164.8°/EL. -4.9° RSSI -56.1(↓8.6)
Box(2nd)	Az. 332.3°/EL. -2.8° RSSI -54.3(↓9.3)	Az.: 164.5°/EL. -3.1° RSSI -57.3(↓9.8)
Box(3rd)	Az. 332.1°/EL. -2.2° RSSI -53.1(↓8.1)	Az. 164.6°/EL. -3.0° RSSI -57.3(↓9.8)
Step(1st)	Az. 336.0°/EL. -1.5° RSSI -45.0 (0)	Az. 165.0°/EL. -3.4° RSSI -47.6(↓0.1)

Table 5. The second experimental test result(Mode-I)

Scan Sequence	Results	
	Master	Slave
Initial	Az. 90.0° El. 0.0° RSSI: -84.8(↓39.8)	Az. 270.0° El. 0.0° RSSI: -86.9(↓39.4)
Box(1st)	Az. 337.4°/EL. -4.6° RSSI -48.6(↓3.6)	Az. 164.8°/EL. -3.6° RSSI -59.4(↓11.9)
Box(2nd)	Az. 337.4°/EL. -4.7° RSSI -53.6(↓8.6)	Az.: 165.0°/EL. -4.1° RSSI -55.8(↓10.8)
Box(3rd)	Az. 335.7°/EL. -4.8° RSSI -53.4(↓8.4)	Az. 163.7°/EL. -3.3° RSSI -55.3(↓7.8)
Step(1st)	Az. 336.1°/EL. -2.2° RSSI -45.0 (0)	Az. 164.1°/EL. -3.6° RSSI -48.2(↓0.7)

Table 3과 Table 4에서 첫 행은 각 안테나의 초기 임의의 지향 방향을 나타내며, 이후 초기지향 후 3회의 박스 스캔을 수행과 마지막으로 1회의 스텝 추적 결과가 제시되었다. RSSI 값의 괄호()내 숫자는 추적 단계 별로 추적 목표 RSSI 값과 차이이다.

결과적으로 상호 마주보는 안테나 간에 요구된 절차에 따라 시스템과 알고리즘이 기능하고 적절한 성능을 보임을 확인하였다. 마스터 안테나는 정확히 최고 RSSI 값을 추적한 반면 슬레이브 안테나는 2회에 걸친 실험결과 최대 0.7°의 추적 오차를 보였다. 이는 짧은 거리에서 실험으로 앞서 지향범위 설명에서 언급한 근거리 추적 오차 영향과 슬레이브 위치에서 주변 클러스터(Cluster) 영향 때문으로 판단되었다. 그러나 전반적으로 추적과 정렬이 정상적으로 이루어졌으며 슬레이브 안테나의 추적 오차 크기가 C 밴드 안테나의 빔 폭 3°와 근거리 추적 상황을 고려할 때 그 수준의 오차 영향은 크지 않다고 판단된다.

3.2 원거리 이격 안테나 추적 정렬 안정화 실험

MODE-II에선 Fig. 10과 같이 마스터와 슬레이브 안테나 간 거리가 1.2 km이며 외란 조건을 고려한 지향, 추적과 정렬 성능 분석이 이루어졌다. 실험장치 구성은 앞서 Fig. 8과 같다.

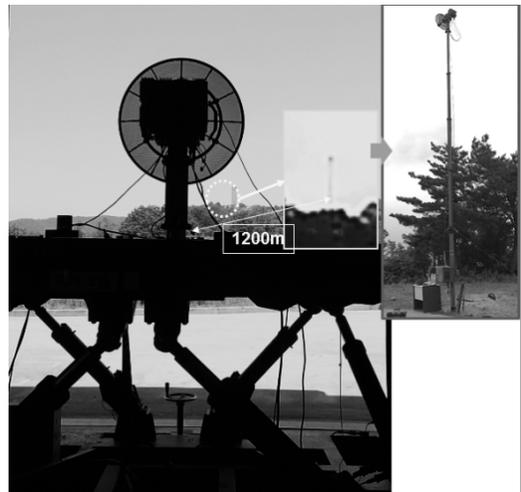


Fig. 10. Experimental test scene for Mode-II using C-band antenna for both sides

Fig. 10과 같이 마스터 안테나는 6 자유도로 움직일 수 있는 모션 시뮬레이터에 설치되어 모사된 외란 조

건에서 ATPC 시스템의 추적과 정렬 성능 분석을 위한 실험이 수행되었다. 외란을 모사하기 위해 사용된 모션 시뮬레이터는 본 연구에선 1 대만 이용할 수 있어 마스터 안테나에 대해서만 적용하였다. 이로 인해 양방향 외란보다 단방향 외란 조건을 고려하였다. 한편, 슬레이브 안테나는 1.2 km 떨어진 산등선에 지지선으로 고정된 마스트(Mast) 상단에 설치되었다.

우선, MODE-II 실험 장소에서 추적 유효성을 확인하기 위해 C 밴드의 마스터 안테나를 방위각(Azimuth)과 고각(Elevation)에서 1%/sec. 속도로 수신 RF 신호를 스캔한 결과 그 빔 패턴은 Fig. 11과 같았다. 이때 방위각과 고각에서 최고 RSSI 값은 각각 -52.20 dBm과 -52.18 dBm 이었다.

특히 방위각과 고각의 빔 패턴에서 주엽(Main lobe)의 정점 부근은 고각과 방위각 패턴이 유사함을 보였고, 부엽(Side lobe)에서는 방위각과 고각 빔 패턴이 다소 차이가 있었다. 이는 모션 시뮬레이터 설치 위치로 인해 마스터 안테나가 상하로 긴 문(Door) 근처에 위치하게 되어 상하와 좌우 방향으로부터 수신 전파 패턴과 클러스터 조건이 다르기 때문이다. 그러나 본 실험에선 부엽과 주엽 간에 RSSI 값 비교에서 차별되므로 최고 RSSI 값 추적에 영향을 주지 않았다.

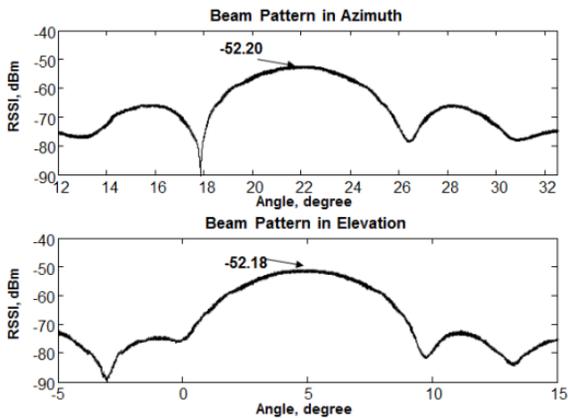


Fig. 11. Beam patterns of C-band antenna at the test site

또한 실험 활동이 전체 통신 시스템과 연동하여 이루어지면서 C 밴드 안테나 주파수 대역 범위 내에서 수시로 변경된 주파수 사용과 웨이브 폼 조건 변화로 안테나 송수신 출력이 다르므로 이에 따른 송수신 출력 변화가 있었다. 따라서 본 논문에서 제시된 각 실험

간 추적 목표 최고 RSSI 값이 상호 다르게 나타났다.

MODE-II의 첫 번째 경우 실험을 위한 마스터 안테나의 초기 정보와 목표 추적 값은 Table 6과 같다. 이때 안테나의 초기지향 방향을 방위각과 고각은 알고 있는 최종 지향 방향으로부터 약 -5° 정도 위치시켜 그 위치에서부터 초기지향, 추적과 정렬 유지 성능을 실험하였다. 그 결과는 Fig. 12에서 Fig. 14를 통해 설명되었다.

Table 6. The initial and the final status of the antenna's heading directions and RSSI values for case-1 in Mode-II

Item (target)	Values	
	Initial	Target
Azimuth(°)	-3.650	1.164
Elevation(°)	-4.005	0.935
RSSI(dBm)	-68.100	-52.636

Fig. 12는 마스터 안테나의 추적 단계별 지향 방향의 변화를 나타내며 Table 6에 제시된 초기지향 각도로부터 추적목표 지향 각도를 추적하고 있음을 보여준다. 그림에서 그래프 초기 3회의 큰 진폭 구간(Envelope 형태)은 박스 스캔 단계이고 마지막 작은 진폭 구간은 1회의 스텝 추적 구간을 나타낸다.

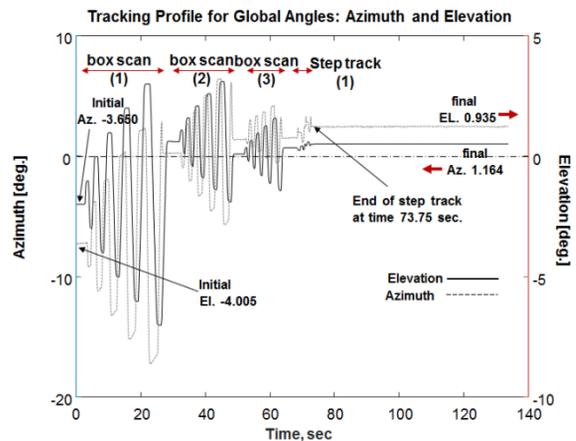


Fig. 12. Tracking profiles for the master antenna's global heading direction for pointing along the LOS

따라서 스텝 추적 완료 후 추적 완료 시간은 73.75 초이며 이후 정렬 유치가 안정적으로 이루어짐을 보였다. 앞서 설명한 바와 같이 유지모드에서는 구동모터가 정지 상태로 전환되고 이후 정렬 선 변화가 기준 조건을 넘으면 모터가 자동으로 구동하여 재 추적과 재 정렬 과정이 진행된다.

Fig. 13은 마스터 안테나에서 추적과 정렬 단계에서 RSSI 값의 추이를 나타내며 마지막 스텝 추적을 통해 최고 RSSI 값에 도달함을 확인할 수 있다. 결과적으로 마스터 안테나는 초기 약 -5° 변경된 위치로부터 수신된 RSSI 값 -68.1 dBm에서 추적 완료 시점인 약 73.75초 경과된 후 추적을 완료하였고 이후 최고 RSSI 값인 -52.636 dBm 위치에서 정렬하였다.

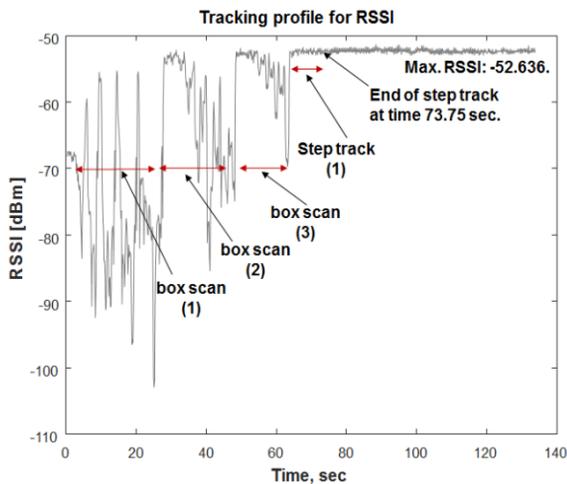


Fig. 13. Tracking profiles of for the maximum RSSI value at the mater antenna

Fig. 14는 마스터 안테나의 추적을 보여주는 또 다른 그래프 표현으로 박스 스캔과 스텝 추적의 단계별 스캔 범위와 최종적으로 최고 RSSI 값을 가진 방위각과 고각 위치에 도달하는 추적 궤적을 나타낸다.

앞서 설명한 바와 같이 초기 추적범위가 방위각 $\pm 10^\circ$ 와 고각 $\pm 5^\circ$ 이므로 Fig. 14의 1차 박스 스캔은 Table 6에서 제시된 안테나 초기 위치로부터 방위각 $-13.63^\circ \sim 6.35^\circ$ 와 고각 $-9^\circ \sim 1^\circ$ 범위에서 이루어졌음을 보였다. 이상과 같이 추적과 정렬 유치에 관한 3 가지 형태의 그래프를 통해 추적 정렬 성능을 확인하였다.

MODE-II의 두 번째 실험은 ATPC 시스템이 외란 조건에서 안정적인 정렬유치 성능을 확인하기 위한

실험이다. 이때 MODE-I의 첫번째 실험 경우와 달리 MODE-II에서는 추적과 정렬이 완료된 후 정렬유치 상태를 가정하여 마스터 안테나를 설치한 시뮬레이터를 움직여 외란을 모사하였다.

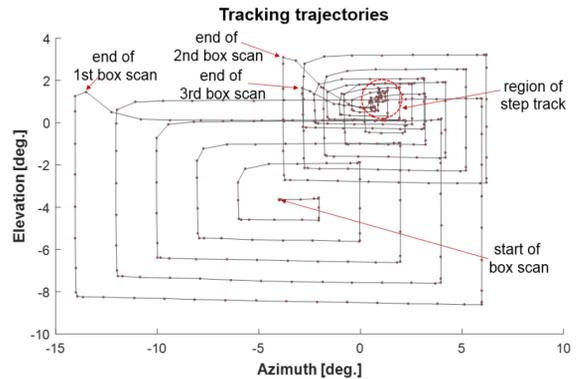


Fig. 14. Trajectories by the box scan and step track towards the maximum RSSI value

이 경우 외란 조건은 Table 7과 같다. 외란 형태는 사인파(Sinusoidal wave)를 가정하였고 각도 변위 폭 (Amplitude)은 1° , 2° 와 3° 로 설정하였다. 또한 주파수는 0.1 Hz와 0.5 Hz를 사용하였다. Jang^[9]과 Beauvais^[10] 등은 바람의 스펙트럼 연구결과 사계절 및 주야간 바람 에너지가 0.1 Hz 이내에 대부분 존재한다고 발표하였다.

그러나 본 ATPC 시스템에 적용한 바람의 주파수는 보다 안전한 설계를 위해 주파수 0.5 Hz까지 고려하였다. 이러한 바람은 지지선으로 고정된 마스트 상단에 탑재된 C 밴드 안테나 구동부 설계와 지향정확도 성능에 영향을 준다. 풍동시험 결과, 풍속 30 m/sec에서 안테나 정면에 최고 300 N의 정적 하중이 작용함을 측정하였으며 지지선에 의해 고정되고 안테나를 장착한 마스트 끝단 변위 측정 실험에서 300 N을 적용하여 각도 변위가 1° 이내임을 확인하였다.

따라서 외란은 Table 7에서와 같이 1° , 2° 와 3° 각도 변위와 외란 주파수 성분은 0.1 Hz와 이보다 빠른 0.5 Hz를 함께 고려하였다. Table 7의 표현 중 Amp (Amplitude)는 외란으로 인한 안테나 각도 변위 값이며 Freq (Frequency)는 주파수를 나타낸다. Table 7에서 피치 외란 1° 와 0.1 Hz 조건이 현실적인 운용 환경으로 본다면 Table 7에서 다른 외란 조건은 상대적으로 심각한 풍속 환경으로 구분된다.

Table 7. External disturbance conditions for Mode-II

Case	Pitch.				Pitch/Roll
	1	2	3	4	5
Amp.(°)	3	2	1	1	3
Freq.(Hz)	0.5	0.5	0.5	0.1	0.5

외란 작용 방향은 Fig. 15에서 보는바와 같이 안테나 혼과 일치하는 축은 롤(Roll), 안테나 측면은 피치(Pitch)이며 지면에 수직 방향은 요(Yaw) 방향으로 정의된다. 그러나 요(Yaw) 움직임은 안테나와 마스트 체결상태와 바람 방향을 고려하여 그 영향이 작다고 가정하였다.

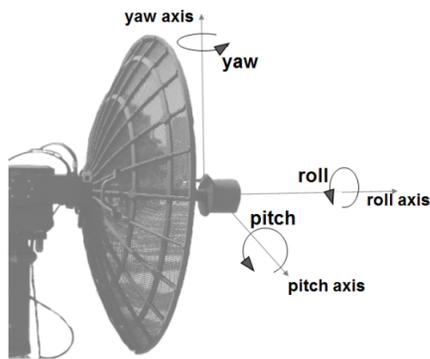


Fig. 15. Definition of the axes of disturbances

실험 결과는 Table 8에 요약하였고 Table에 표현된 조건(Condition) 항목에서 Pitch는 피치 외란이며, Roll/Pitch는 롤과 피치의 두 방향에서 동시 외란 조건을 나타낸다.

Table 8의 CASE No. 1 ~ CASE No. 4의 결과를 보면 CASE No. 1 실험에서 최고 RSSI 값의 RMS 편차가 다른 경우 결과에 비해 상대적으로 높으나 전반적인 결과는 진폭과 주파수 변화에도 안테나 간 정렬이 안정적임을 보였다.

또한 Roll/Pitch 외란이 동시 작용한 CASE No. 5의 경우 이전 경우와 비교하여 큰 차가 없으며 전반적으로 최고 RSSI 값에서 편차가 0.29 dBm 이내에서 유지되었다. Fig. 11의 빔 패턴 그래프를 참고하면, 편차 0.29 dBm은 최고점으로부터 약 0.3° 벗어난 위치로서 안정적인 정렬유지 상태이다. 여기서 모든 결과는 5분(300초)간 측정된 데이터를 통계적으로 처리하여 분석

되었다.

Table 8. Pointing performance for Mode-II under various disturbance conditions

CASE No	Condition	Run	Amp.(°)/ Freq.(Hz)	Peak area of Beam [RSSI] (dBm)	
				Mean	RMS
1	Pitch 1	1	±3.0/ 0.5	-43.55	0.29
		2		-43.55	0.24
2	Pitch 2	1	±2.0/ 0.5	-43.44	0.09
		2		-43.42	0.08
3	Pitch 3	1	±1.0/ 0.5	-43.23	0.11
		2		-43.19	0.11
4	Pitch 4	1	±1.0/ 0.1	-43.12	0.09
		2		-43.10	0.09
5	Roll/ Pitch 5	1	±3.0/ 0.5	-43.14	0.11
		2		-43.14	0.11

본 논문에서는 각 CASE 별 유사한 결과를 보여주므로, 지면 사용을 고려하여 CASE No. 1과 CASE No. 5의 각각 Run-1 결과만을 제시하였다.

우선 Fig. 16은 CASE No. 1/Run-1에 대한 결과로서 외란 유무 조건과 정렬 유지 상태에서 마스터 안테나의 방위각(그림의 상단)과 고각(그림의 하단)변화를 보여준다. 이때 외란 유무에 관계없이 안정된 지향각도를 보여준다.

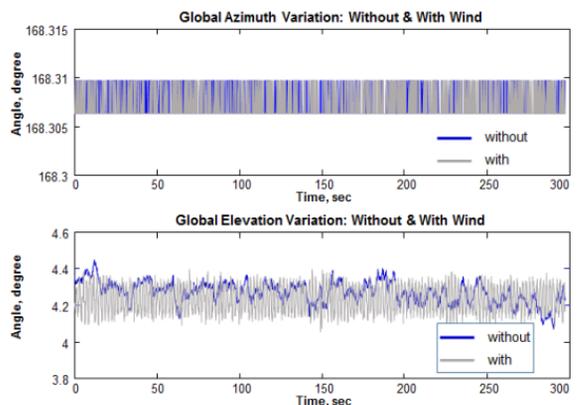


Fig. 16. Antenna's global heading directions with/without the wind loading

Fig. 17의 상단은 외란이 없는 상태, 하단은 $\pm 3^\circ$ 의 피치 외란 상태를 나타낸다. 특히 상단의 각도변화는 외란 없는 상태에서도 발생한 안테나의 작은 움직임에 의한 AHRS 센서 신호이다.

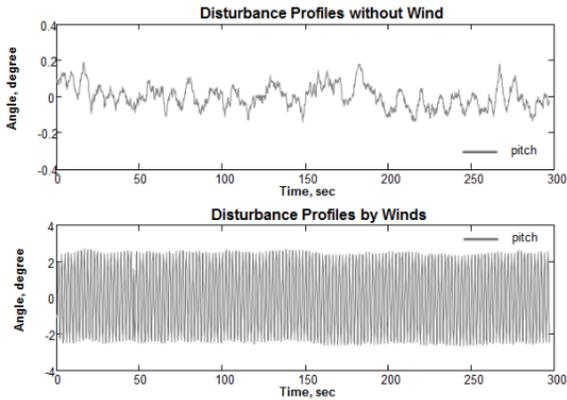


Fig. 17. Pitching motion with/without wind load

Fig. 18의 상단과 하단은 각각 외란 없는 경우와 있는 경우에 대한 정렬 유지모드에서 RSSI 값 변화 그래프이다. 상단 그래프를 보면 외란 없는 상태에서도 발생한 안테나의 작은 움직임에 의한 최고 RSSI 값에 변화가 있음을 보였다.

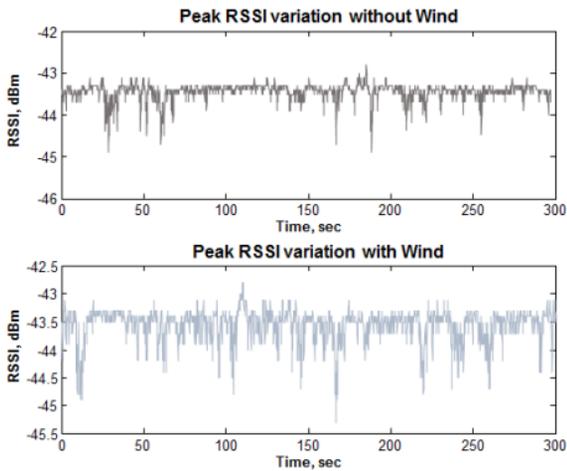


Fig. 18. The max. RSSI variations with/without the wind loading

Fig. 17과 Fig. 18의 두 결과를 비교하면 바람 유무에 관계없이 최고 RSSI 값이 변하지만 특히 피치 외란

3° 와 0.5 Hz 조건에서도 최고 -43.5 dBm 근처에서 안정적으로 정렬유지 상태를 보였다.

Table 9는 Table 8의 CASE No. 1/Run-1 실험 결과로서 피치 외란에서 외란 유무에 따른 신호 오차는 0.11 dBm로 외란 유무 간 신호가 매우 근접함을 보였다. 여기서 신호 오차(Signal error)는 추적 목표 값에 대한 엔코더 센서 값과 차이이다. 오차 신호는 소수점 아래 5자리 위치에서 상호 구별할 수 있었다.

Table 9. Result summary for CASE No. 1/Run-1

Title	Results	
	Without Wind	Under Wind
Global heading ($^\circ$): Azimuth/Elevation	168.31 4.27	168.31 4.24
Signal error ($^\circ$): Azimuth/Elevation	0.03004/ -0.04356	0.02996/ -0.01116
RSSI(rms) (dBm) Standard deviation	-43.44 0.20	-43.55 0.29
Difference in RSSI (rms) (dBm)	0.11	

Fig. 19 역시 Fig. 17에서 설명한 바와 같이 상단의 외란 없는 경우 나타난 각도 변화는 안테나의 작은 움직임 상태이며 하단은 진폭 $\pm 3.0^\circ$ 와 주파수 0.5 Hz 크기의 피치와 롤 외란이 동시 작용한 CASE No. 5/Run-1의 경우이다.

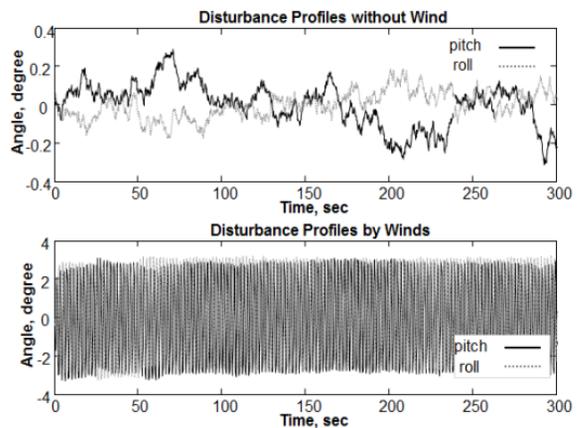


Fig. 19. Pitch/roll motions with/without wind load

이와 같이 피치와 롤 외란이 동시 발생한 경우 정렬 유지모드에서 각각의 최고 RSSI 값의 변화는 Fig. 20과 같다. 외란 조건에서 외란이 없는 상태에 비해 신호 변화 폭이 다소 넓어졌음을 볼 수 있다.

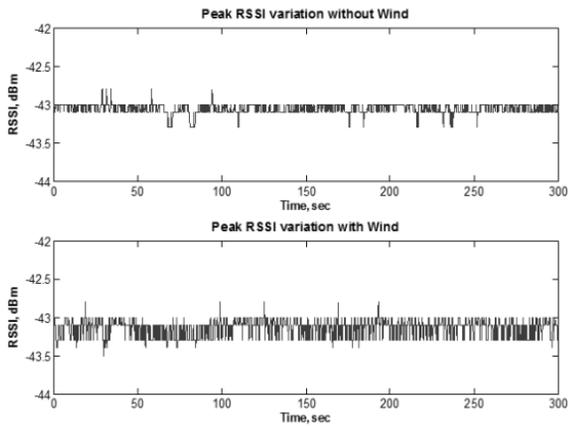


Fig. 20. The max. RSSI variations with/without the wind loading

두 방향 외란을 동시 적용한 CASE No. 5/Run-1 실험 결과는 Table 10과 같으며 이전의 CASE No. 1/Run-1 결과처럼 안정적인 정렬유지 성능을 보였다.

Table 10. Result summary for CASE No. 5/Run-1 case

Title	Results	
	Without Wind	Under Wind
Global heading (°): Azimuth/Elevation	168.59 4.79	168.59 4.73
Signal error (°): Azimuth/Elevation	0.02852/ -0.07541	0.02976/ -0.01303
RSSI(rms) (dBm) Standard deviation	-43.06 0.07	-43.14 0.11
Difference in RSSI (rms) (dBm)	0.04	

Fig. 21은 외란 상태를 나타내는 모션 시뮬레이터가 상하로 움직임에도 시뮬레이터에 설치된 마스터 안테나가 1.2 km 이격 설치된 슬레이브 안테나와 최고

RSSI 점에서 정렬 선을 잘 유지하고 있음을 보여준다.

이상의 Mode-II 실험 결과 ATPC 시스템은 1.2 km의 원거리에서도 추적과 정렬이 원활하게 이루어졌으며 보통의 외란 조건인 진폭 1°/0.1 Hz 환경과 더 큰 규모의 외란으로 고려된 3°/0.5 Hz 조건에서도 시스템은 자동지향, 추적과 정렬 유지 기능을 안정적으로 수행하였다. 이를 통해 ATPC 시스템을 지원하는 하드웨어 뿐 아니라 적용된 추적 제어 알고리즘이 정상적이며 안정적으로 운용됨을 확인할 수 있었다.

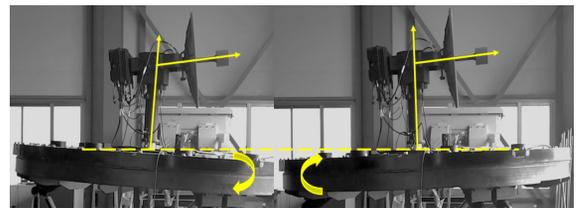


Fig. 21. ATPC system behavior under up-down pitching motion

4. 결론

본 논문은 기존 군에서 사용 중인 이격 운용 안테나 시스템이 수동적으로 상호 위치 추적과 정렬 시키는 단점을 극복하기 위해 제안된 ATPC 시스템을 통해 상호 마주보는 안테나 간 자동 위치 추적과 자동 정렬 기법에 의해 이루어질 수 있음을 확인하였다.

또한 ATPC 시스템을 구성하는 각종 센서 들과 구동 제어 관련 하드웨어와 적용된 소프트웨어 알고리즘은 특정한 외란 환경에서도 동일한 성능을 보였다.

이상과 같이 자동추적 및 정렬 기능을 장착한 ATPC 시스템에 대한 운용 안정성과 설계 효과가 본 논문에서 제시된 일련의 시뮬레이션과 실험에 의해 입증되었다.

References

- [1] Gimm, H. I., Cho, S. H., et al., "Tracking Scheme of the Maximum Energy of RF Signals for Automatic Pointing of Antenna Systems," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 805-806, 2013.
- [2] Gimm, H. I., Cho, S. H., et al., "Tracking and

- Control Based on Maximum RF Signals between Facing Antennas,” KSME 13DC Conference, pp. 144-145, 2013.
- [3] Cho, D. H, “A Study on the Step Tracking of Satellite Antenna System,” The Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 39, No. 1, pp. 65-69, 2002.
- [4] Kim, H. C., Lee, J. S. and Gimm, H. I., “A Study on Optimization of Step Tracking Algorithm of Antenna,” 2012 Conference of Korea Military Science and Technology, p. 1017, 2012.
- [5] Han, K, Guo, W and Gao, X, “A Step Tracking on the SOTM,” IEEE, pp. 214-216, 2010.
- [6] Cho, C. H, Lee, S. H, et. al., “Antenna Control System Using Step Tracking Algorithm with H^∞ Controller,” Int. Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 1, No. 1, IEEE, pp. 83-92, March 2003.
- [7] Tom, N. N. and Heckert, G. P., “Step Track - A Simple Autotracking Scheme for Satellite Communication Terminal,” AIAA 3rd Communications Satellite Systems Conference, LA California, April 1970
- [8] M. Ménez, X. Deplancq, B. Palacin and H. Gonzalez Perez, “Antenna Pointing Error Effects on Global Capacity for Broadband ACM Systems,” 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, pp. 1-12, 2010.
- [9] Jang, J. J. and Lee, Y. L, “A Study of Along Wind Speed Power Spectrum for Taiwan Area,” Journal of Marine Science and Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 71-77, 1998.
- [10] Beaupuits, J. P. P and Otárola, A., et al, “Analysis of Wind Data Gathered at Chajnator,” ALMA Memo No. 497, 2004.