

유도무기용 전파고도계 주파수변환기 및 Ku-대역 안테나 개발

A Development of Radar Altimeter Frequency Converter and Ku-Band Antenna for a Missile

김 태 훈* 노 진 입*
Taehoon Kim Jin-Eep Roh

ABSTRACT

A radar altimeter which measures the distance using radio wave developed by domestic technology has been applied to various missiles. It is used also for calculating the error of integrated navigation technique. There are a couple of methods to reduce the error but in this paper, we proposed to utilize existing C-band radar altimeter main body with frequency conversion. We designed and manufactured the frequency converter and Ku-band antenna to accomplish this goal. From the test results of products' function and performance, we could expect the possibility of applying this method to enhance the missiles' integrated performance.

Keywords : Radar Altimeter(전파고도계), Frequency Converter(주파수 변환기), Ku-band Antenna(Ku-대역 안테나), HPBW(Half Power Beam Width, 반전력빔폭)

1. 서 론

전파고도계는 해면 혹은 지면으로 전파를 방사한 후 반사되어 되돌아온 수신신호와의 시간차를 계산하여 거리를 측정하는 장치이다. 순항유도무기에서는 절대 고도를 측정하는 기압고도계나 GPS수신기 이외에 상대고도를 정밀하게 측정할 수 있는 전파고도계를 탑재하는 경우가 많다. 특히 적으로부터의 피탐성을 줄이기 위해 해면 저고도 비행을 수행하는 경우라면 전파

고도계의 사용은 필수적이다. 국내에서는 함대함 유도 무기인 해성I의 개발을 수행하면서 프랑스 Thomson-CSF社의 전파고도계를 모델로 하여 국산화를 완료하였고, 현재 해성I 및 다양한 유도무기체계의 구성품으로 사용되고 있다. 개발된 국산화 전파고도계는 FMCW(Frequency-Modulated Continuous-Wave, 연속파 주파수 변조) 방식으로 구현되어 있으며 주파수는 C-대역을 이용하고 Bi-static모드의 송수신 안테나가 따로 있는 형태이다.

체계 탑재 센서인 전파고도계의 측정오차를 줄여 유도무기의 성능을 향상시키기 위해서는 먼저 오차 발생 요인을 파악해야 한다. 측정오차 발생 요인의 첫 번째는 전파고도계 송신신호를 발생시키는 핵심부품

† 2013년 5월 1일 접수~2013년 9월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김태훈(gayowayo@add.re.kr)

인 VCO(Voltage Controlled Oscillator, 전압제어발진기)의 비선형성에 기인한다. VCO는 제어전압에 따라 송신주파수신호를 생성해주는 소자로서 주파수 변조기 율기를 이용하여 고도를 측정하는 전파고도계로서는 VCO의 선형 특성이 우수해야 고도 측정오차를 줄일 수 있다.

두 번째 오차 발생 요인은 안테나의 빔폭이다. 기존 전파고도계 안테나 빔폭은 피치 방향으로 $45^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 롤 방향으로 $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 의 규격으로 설계, 제작되고 있는데 이는 유도무기의 거동을 고려했을 때 상당히 넓은 빔폭을 가지고 있다고 볼 수 있다. 빔폭이 넓으면 고도 정보가 평활화되고 유도무기의 거동 범위가 넓어지는 장점은 있지만 에너지의 분산으로 직하방의 고도 측정에는 정밀성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 고도 측정 정밀도를 높이기 위해서는 안테나 빔폭을 줄이기 위한 방법을 고려해 볼 수 있다.

전파고도계의 측정오차를 줄이기 위한 방법 중 전파고도계 본체의 소자를 변경하여 개발하는 것은 전반적인 수정 소요가 크고 신뢰도 검증에 상당한 시간과 노력이 필요한 반면 안테나의 빔폭을 줄이는 방법은 안테나의 재설계를 통해 상대적으로 적은 노력을 통해 구현할 수 있는 장점이 있다.

전파고도계에서 측정된 고도정보는 유도무기 통합항법계산에 이용되는데, 기존 전파고도계의 실측 고도정보를 이용한 항법계산 오차를 기준(1)으로 했을 때, 전파고도계를 모델화하고 HPBW를 다양하게 바꿔가며 분석한 결과 Table 1과 같이 나타났다. SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)의 해상도가 각각 3arcsec, 1arcsec일 때 상대적인 항법 성능을 보면 피치방향, 롤 방향으로 약 20° 의 빔폭을 가지면 현재 구현되는 통합항법 오차 부분에서 2배 이상의 성능개선 효과를 낼 수 있는 것으로 분석되었다. 이보다 빔폭을 줄이면 항법 오차 면에서는 좋지만 유도무기 운용 거동에 따른 운용성에 제한이 발생하기 때문에 20° 수준이 적당한 것으로 판단하였다. 이에 따라 전파고도계 본체는 기존 개발품을 활용하되 안테나의 빔폭을 20° 수준으로 줄임으로써 측정오차의 향상을 가져오고 그 결과 통합항법 성능을 향상시키는 것으로 개발 목표를 설정하였다.

본 논문에서는 유도무기의 항법성능을 개선시키기 위한 방법으로 기존 전파고도계 안테나의 빔폭을 줄임으로써 고도 측정오차를 줄이는 방법을 제안하였다. 그 구현 방법으로 기존 C-대역의 운용주파수를 Ku-대

역으로 변환하는 주파수변환기와 Ku-대역의 안테나를 설계/제작하여 적용하였다. 제작품에 대한 다양한 성능 입증시험을 통해 전파고도계의 기능 및 성능이 정상적으로 구현되었음을 확인하였다.

Table 1. Comparison of Navigation Error due to RA's HPBW Change

HPBW	SRTM_3arcsec	SRTM_1arcsec
실측	1(기준)	1(기준)
60°	1.05	1.02
40°	0.85	0.81
20°	0.36	0.33
10°	0.15	0.13

2. 주파수변환기 및 안테나 설계, 제작

현재 적용하고 있는 C-대역 안테나는 Fig. 1과 같은 형태로서 마이크로스트립 패치를 배열하여 원하는 빔을 형성시킨다. 이를 확장하여 안테나의 빔폭을 기존 대비 1/3 수준으로 줄이려면 안테나 개구면적이 기존 대비 9배 수준으로 넓어져야 한다^[1]. 하지만 유도무기는 가용 공간에 한계가 있기 때문에 무한정 안테나의 개구면적을 키워서 적용하기는 어렵다. 따라서 안테나의 빔폭을 줄이면서 안테나의 크기를 기존 수준과 유사하게 가져가기 위해서는 안테나의 운용주파수를 3배 이상 올리는 방법을 고려될 수 있으며, 이 방법이 유도무기와 같이 크기가 제한된 곳에 적용하기에 유리하다. 따라서 본 논문에서는 운용주파수를 높이는 방법을 선택하였으며, 운용주파수는 Ku-대역 중에서 항공용으로 가용한 주파수를 조사하여 선정하였다^[2].

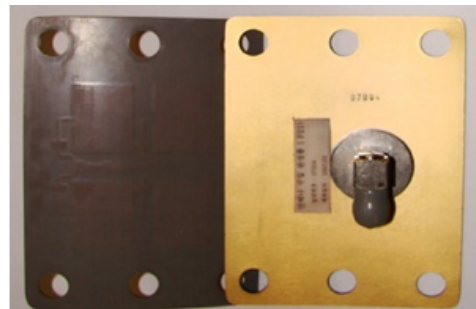


Fig. 1. C-Band Antenna(Front, Rear)

전파고도계 본체는 기존의 C-대역을 그대로 사용하기 때문에 송신 시에는 C-대역 신호를 Ku-대역 신호로 상향 변환하여 안테나로 입력하고, 수신 시에는 Ku-대역 신호를 C-대역 신호로 하향 변환하여 본체 수신부로 입력하여야 한다. 이를 위해서는 전파고도계 본체와 안테나 사이에 주파수 대역을 상향, 하향 변환해주는 주파수변환기 개발이 필요하다.

2장에서는 개발 목표를 만족시키기 위한 주파수변환기와 안테나의 설계 내용에 대해 제시한다.

가. 주파수변환기 설계 및 제작

기존 전파고도계 본체를 활용하고 향후 유도무기에 탑재할 가능성이 있다는 점에서 주파수변환기는 다음과 같은 요구사항을 바탕으로 설계하였다.

- ① C-대역, Ku-대역 상호 변환을 만족하되 주파수는 변조대역은 그대로 유지하여야 한다.
- ② 온도 변화에 따른 이득(gain) 변화는 0±2dB 수준이어야 한다.
- ③ 유도무기에 장착 가능해야 하므로 소형화 한다.
- ④ 상향/하향 변환 기능은 하나의 장치로 구현한다.
- ⑤ 22~32Vdc에서 운용 가능해야 한다.
- ⑥ 방수 및 EMI 차폐가 가능해야 한다.

위 요구조건을 바탕으로 설계한 주파수변환기의 송수신부는 Fig. 2와 같다. 상향, 하향 주파수 변환을 위한 방법으로는 믹서를 이용하였고, C-대역 주파수와 선정한 Ku-대역 주파수 이동을 위해 OO.OOGHz(이하 기준 주파수)의 주파수 합성기를 선정하였다.

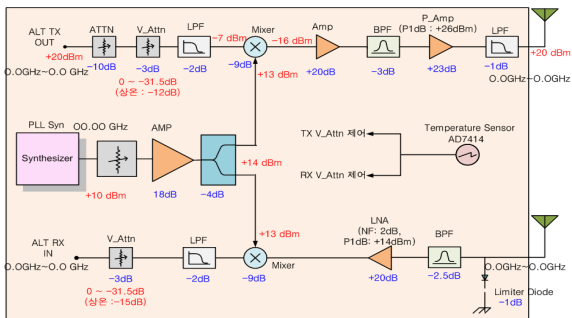


Fig. 2. Block Diagram of Frequency Converter's Transceiver

주파수변환기의 송신부는 전파고도계 본체에서 입

력된 C-대역 신호를 고정감쇠기, 가변감쇠기 및 필터를 거쳐 기준 주파수 신호와 함께 믹서에 입력된다. 믹서의 출력은 두 신호의 합에 해당하는 주파수 신호와 차에 해당하는 주파수 신호가 나오는데, 송신부는 운용주파수를 C-대역에서 Ku-대역으로 높여야 하므로 합에 해당하는 신호만을 걸러내기 위하여 대역통과필터를 이용하였다. 그리고 전반적인 신호 이득이 0dB에 맞춰질 수 있도록 파워앰프와 필터를 거쳐 안테나로 출력한다.

주파수변환기의 수신부는 위의 과정을 역으로 수행한다. 수신 안테나를 통해 인입된 신호는 대역통과필터를 통해 필요 대역만을 걸러내고 LNA(Low Noise Amplifier, 저잡음증폭기)를 거쳐 믹서로 입력된다. 이때에는 Ku-대역의 주파수를 C-대역으로 낮춰야 하므로 믹서출력 중 차 주파수 신호를 이용하기 위해 저역통과필터가 사용되며, 전파고도계 본체 수신단으로 입력되는 신호의 크기를 맞추주기 위해 가변감쇠기를 거친다. 각 단계를 거친 출력 신호는 입력 대비 약 6.5dB 감쇠가 있게 설계를 하였는데 이는 신호의 크기를 크게 하면 노이즈 레벨도 높아지기 때문에 전파고도계 본체 수신단의 요구 노이즈 레벨 정도로 낮추기 위해서이다.

Table 2. Change of Signal Level due to Temperature Change

온도	-40℃	25℃	85℃
Attenuator	0.2	0	-0.2
Mixer	1.5	0	-0.5
Amp	1	0	0
Pamp	3	0	-2
계	5.7	0	-2.5

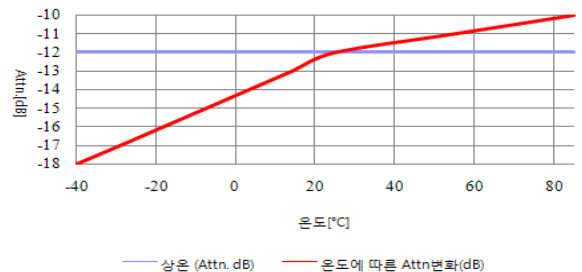


Fig. 3. Compensation of Attenuation Value due to Temperature Change

주파수변환기 내부에 사용되는 부품들은 운용 온도에 따라 신호의 크기가 Table 2와 같이 변한다. 넓은 범위의 운용 온도 조건을 갖는 유도무기 탑재를 고려하여 내부 회로 설계 시 온도센서(AD7414)에서 계측된 온도를 기반으로 가변감쇠기의 Fig. 3의 형태로 감쇠율을 보상하여 전체적인 신호의 크기가 동적 영역 내에서 흔들림이 없도록 설계하였다.

전원부 회로의 블록도는 Fig. 4와 같다. 유도무기 내부 사용 전압 28V를 입력받아 내부 디지털 소자 및 연산장치에서 사용할 수 있는 전압인 ±5V 및 3.3V로 변환하였다. MIL-STD-461E의 유도무기 EMI(Electro Magnetic Interference, 전자기적 간섭)규격^[3]을 고려하여 EMI 필터를 적용하였다.

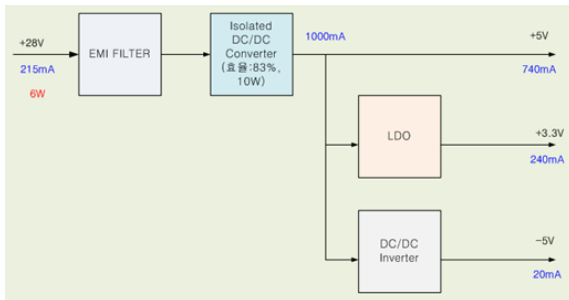


Fig. 4. Block Diagram of Power Supply Part

주파수변환기 내부에는 C-대역, Ku-대역 고주파 신호 및 국부발진기 신호들이 혼재되어 있기 때문에 상호 간섭이 있지 않도록 내부 및 외부 차폐 설계에 주의를 기울여야 한다. 주파수변환기 내외부에 EMI 개스킷을 Fig. 5와 같이 조밀하게 적용함으로써 차폐 성능을 구현하였다.

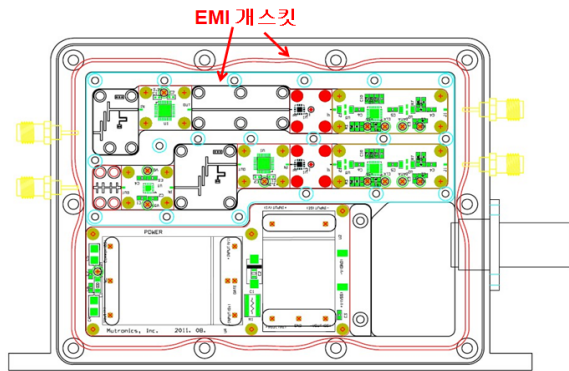


Fig. 5. EMI Gasket in Frequency Converter

위의 설계를 바탕으로 실제로 제작한 주파수변환기 형상은 Fig. 6과 같다.



Fig. 6. Figuration of Frequency Converter

나. 안테나 설계 및 제작

안테나는 향후 유도무기 탑재 가능성을 고려하여 다음과 같은 요구사항을 기초로 하여 설계하였다.

- ① 주파수는 Ku-대역 내 지정된 주파수 범위를 사용한다.
- ② 이득은 14dBi 이상이어야 한다.
- ③ 빔폭은 수평/수직 각각 $17^\circ \pm 3^\circ$ 이어야 한다.
- ④ 전압정재파비는 운용 주파수 내에서 2.0 이하이어야 한다.
- ⑤ 유도무기 크기를 고려하여 기존 안테나 크기 수준이어야 한다.
- ⑥ 유도무기의 형상을 고려하여 외피는 곡면으로 제작하고 운용성을 고려하여 구조적으로 강건하고 방수 기능을 가져야 한다.

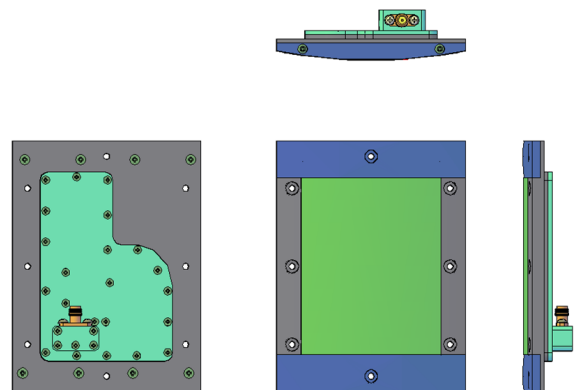


Fig. 7. Figuration of Antenna Design

안테나 형식(type)은 마이크로스트립 형식과 도파관 형식을 고려해 볼 수 있는데 상기 설계 요구조건을 고려할 때 도파관 형식이 성능과 환경성 측면에서 유리

하다고 판단되어 도파관 슬롯 배열 형식으로 안테나를 설계하였다. HFSS(High Frequency Structure Simulation) 툴을 이용하여 Fig. 7, Fig. 8과 같은 형태로 안테나를 설계하였다.

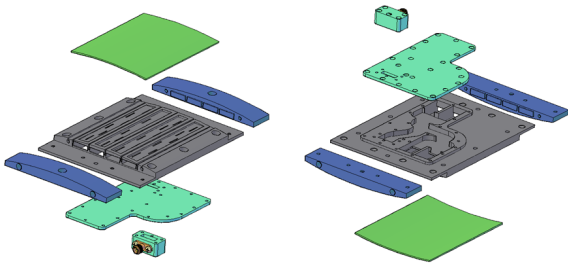


Fig. 8. Disassembled Figuration of Antenna

운용주파수 범위 내에서의 방사 패턴이 요구조건을 만족시키는가에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9와 같다. 운용주파수 중 중심주파수(OOGHz)에 대한 수평, 수직 방사패턴이지만 양쪽 끝 주파수도 유사한 수준으로 나온다. 주엽의 이득은 19dB이고 빔폭은 15°~20° 정도로 요구 성능을 만족시킴을 알 수 있다. 레이돔을 포함한 실제 제작 후 실측하였을 때에도 이 수준에서 벗어나지 않았다.

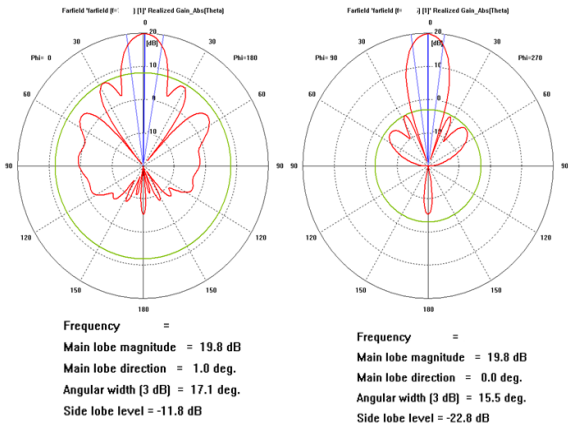


Fig. 9. Horizontal and Vertical Antenna Pattern

안테나 반사손실(R.L. : Return Loss)에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 10과 같다. 운용 주파수 내에서 15dB 이하 수준의 반사손실이므로 전압정재파비(VSWR : Voltage Standing Wave Ratio)는 식 (1)에 의해 1.5 이하 수준으로서 요구조건을 만족한다.

$$VSWR = (10^{R.L./20} + 1) / (10^{R.L./20} - 1) \quad (1)$$

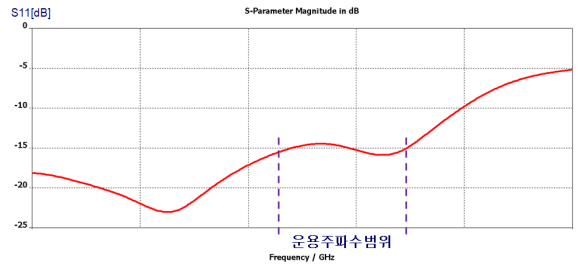


Fig. 10. Antenna Return Loss Simulation Result

위의 설계 과정을 통해 실제 제작한 안테나 형상은 Fig. 11과 같다.



Fig. 11. Figuration of Antenna

3. 주파수변환기 및 안테나 기능 시험

기존 전파고도계 본체에 2장에서 설계, 제작한 주파수변환기 및 안테나를 연동하여 기능 시험을 수행하였다. 시험은 두 단계로 나눌 수 있다. 먼저 주파수변환기의 상향/하향 변환 기능 구현을 확인하는 시험과 안테나까지 포함한 고도측정 기능 및 성능 확인 시험이다. 본 개발품은 유도무기 체계 적용성과 유용성을 확인하기 위한 것으로서 유도무기 체계종합시험을 수행하지는 못했지만 전파고도계 점검장비와 비행선(기구)을 이용하여 전파고도계의 기능 및 성능시험을 수행하여 고도 측정오차를 줄일 수 있으며, 체계 적용이 가능함을 확인하였다.

가. 주파수변환기 기능 시험

주파수 변환기능을 포함한 전파고도계 본체와의 연동 기능을 확인하기 위해 Fig. 12와 같이 시험 장비를 구성하였다.

전원공급기는 전파고도계 본체와 주파수변환기에

전원을 공급해주고 전파고도계 제어기는 전파고도계의 송신 명령을 인가한다. 송신된 신호는 안테나, 자유공간 및 반사매질의 감쇠정도를 모의하는 가변감쇠기와 송신 신호의 시간 지연 역할을 하는 고도모의기를 통해 다시 주파수변환기와 전파고도계 본체로 들어온다. 전파고도계 본체에서는 송신 및 수신 신호의 시간차를 계산하여 전파고도계 제어기 쪽으로 1553B 통신으로 결과 값을 출력한다. 운용 고도범위 내의 8가지 모의고도에 대해 정상적인 값이 출력되어 주파수변환기의 기능 구현이 정상적임을 확인할 수 있었다.

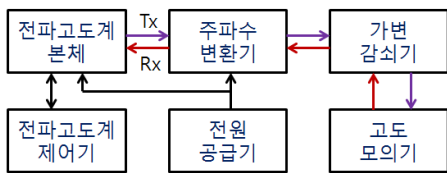


Fig. 12. Block Diagram for Frequency Converter Functional Test

나. 안테나 포함 기능 시험

Fig. 12의 구성에서 가변감쇠기와 고도모의기를 제거하고 송신 및 수신 안테나를 연결하면 실제로 구현하고자 했던 구성도가 된다. 항공기에 탑재하여 운용 고도 전반을 비행하면서 고도를 측정하면 전체 고도계의 성능을 정확히 확인할 수 있었지만 여건상 항공기가 가용하지 않아 우회적인 기능 확인 방법을 고안하였다.

먼저 비행 환경에서 운용 기능을 확인하기 위하여 기구를 이용한 시험을 수행하였다. Fig. 13과 같이 원치에 줄을 매어 상승 및 하강이 가능한 고도측정을 위한 기구 밑쪽에 시험 구성품을 Fig. 14와 같이 배치하여 측정하였다. 고도 측정의 정확도 확인을 위해 DGPS(Differential GPS) 수신기도 함께 탑재하여 시험을 수행하였다.



Fig. 13. Apparatus for Altitude Measure Test



Fig. 14. Equipment Placement for Altitude Measure Test using Balloon

기구의 특성상 탑재 중량의 한계와 바람의 영향으로 인해 안정된 자세에서 연속적인 자료 획득에는 어려움이 있었으나 약 50m 정도의 높이까지 기구를 상승 및 하강하며 자료 획득한 결과는 Fig. 15와 같다. 본 시험을 통해 거리 정확도는 정확히 도출하기는 어려웠지만 안테나까지 포함한 시험을 통해 개발품들의 기능이 구현되었음을 확인할 수 있었다. 획득된 자료에서 비정상적으로 보이는 부분은 바람의 영향으로 장비 부착부의 자세가 직하방을 향하지 않고 다른 방향으로 지향할 때 나타난 현상으로 비교적 안테나 빔폭이 좁음에 따라 나타나는 불연속적인 자료이다.

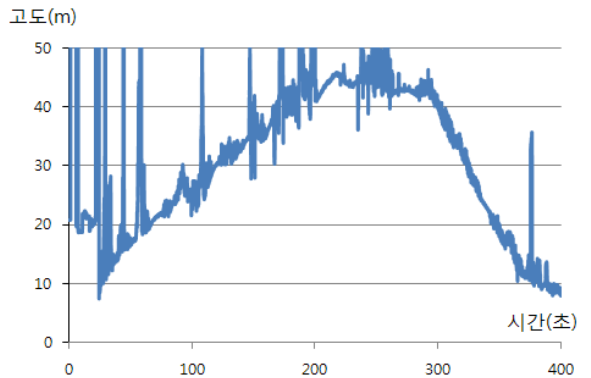


Fig. 15. Altitude Data Obtained by Balloon Test

본 시험을 통해 정성적인 기능은 확인하였으나 정량적인 기능을 확인하기 위해서는 안정적인 자세에서의 고도 획득 시험이 필요로 했다. 그리고 기존 전파고도계 안테나를 포함한 고도측정 성능과의 비교를 통해 개발품들을 적용하였을 경우에도 유도무기 탑재에 무리가 없음을 확인할 필요가 있었다. 이에 대한 검증으로서 가장 좋은 방법은 탑재 비행시험^[4]을 통해 기존

과 신규 구성 전파고도계의 자료를 획득하여 비교 평가하는 것이지만 여건상 먼저 지상에서의 비교 평가 수행을 추진하였다.

비교 시험을 위한 전체적인 구성은 Fig. 16과 같다. 전파고도계 본체 1대에는 기존에 사용하던 C-대역 안테나를, 다른 전파고도계 본체 1대에는 본 논문에서 개발한 주파수변환기와 Ku-대역 안테나를 연결하고 동시에 자료를 획득할 수 있도록 제어 노트북을 연결한다. 이 때 두 대의 전파고도계 본체를 제어하기 위해서는 한 대의 1553B RT(Remote Terminal, 원격 터미널) 번호를 변경하고 해당 RT의 자료를 받는 프로그램을 구현하였다.

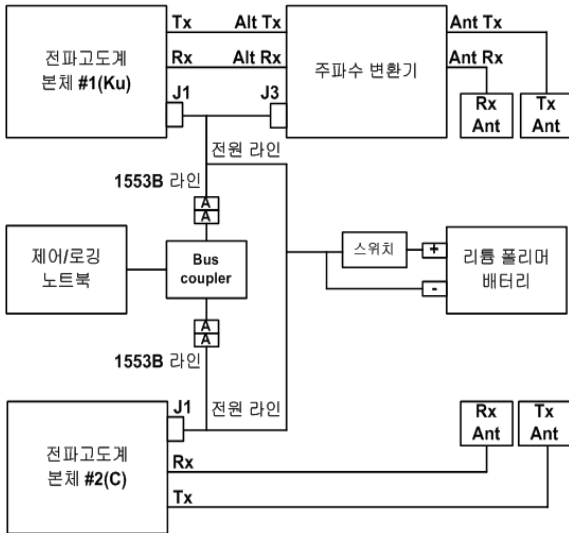


Fig. 16. Block Diagram of Comparison Test between Old and New RA

신뢰성 있는 평가를 위해서는 전기적 구성 뿐 아니라 기구적 평가 장치 제작도 필요하였다. 두 가지 전파고도계를 지상에서 동일한 방향을 지향할 수 있도록 Fig. 17과 같은 측정 치구를 제작하였다.

시험 방법은 측정 치구를 건물 벽면을 향해 특정 거리만큼 이격한 상태에서 두 개 전파고도계 구성의 자료를 획득하여 비교하는 것이다. 이 때 안테나 케이블 및 주파수변환기 통과 경로도 고도 효과로 나타나기 때문에 분석 시에는 이를 배제하여야 한다. 본 시험 결과를 분석할 때에는 5m 이격거리 시험에서는 양쪽 모두 오차가 없다고 가정하고 케이블 및 주파수변환기로 인한 바이어스를 구하였다. 그리고 나머지 이격

거리들에 대한 측정거리를 계산할 때 이 값을 반영하여 전파고도계의 측정거리 및 오차를 계산하였다. 실제 유도무기에 탑재하고자 할 때에는 다양한 시험을 통해 바이어스 값을 정확히 산출하는 것이 필요하지만 본 시험의 목적인 기존 전파고도계와 개발 전파고도계와의 비교 시험을 위해서는 상대적인 비교로 평가가 가능하다고 판단하였다.



Fig. 17. Altitude Gathering Test Equipment

Table 3. Performance Comparison between Old and New RA

이격거리 (m)	기존 전파고도계		개발 전파고도계	
	측정거리 (m)	오차 (%)	측정거리 (m)	오차 (%)
5	5.0(기준)	0(기준)	5.0(기준)	0(기준)
10	9.95	-0.50	10.05	+0.50
15	14.8	-1.33	15.05	+0.33
20	19.65	-1.75	19.95	-0.25
25	24.55	-1.80	25.05	+0.20

비교 시험 결과는 Table 3과 같다. 지상에서 반사 표적과 이격하여 시험할 수 있는 거리에 한계가 있기 때문에 전체 운용 범위 중 상당히 짧은 거리의 몇 지점에 대해서만 시험을 수행하였다. 획득 자료의 해상도나 지상 시험 표적의 여건 상 고도모의기를 사용하여 측정된 것만큼 깨끗하게 유지되는 자료가 출력되지는 않았지만 둘 사이의 경향 및 어느 정도의 성능 비교는 수행할 수 있었다. 본 시험을 통해 기존 C-대역 안테나를 적용한 전파고도계의 측정 성능에 비해 주파수변

환기와 Ku-대역 안테나 개발품을 적용한 전파고도계가 측정 성능에 저하가 없음을 알 수 있었다. 수치상으로는 개발품의 성능이 상당히 더 좋아 보이지만 시험 환경을 고려하면 둘 다 오차 범위 내에서 측정 오차 규격을 만족하는 수준이고 많은 추가 시험이 필요하다고 해석할 수 있다.

4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 유도무기 통합항법성능을 향상시키기 위한 방안의 하나로 전파고도계의 오차 특성을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. 오차 특성 개선 방법으로 전파고도계 본체의 개량 개발도 가능하지만 본 연구에서는 전파고도계 안테나의 빔폭을 줄이는 방법을 제안하였고, 구현 방법으로는 유도무기 탑재 가능한 공간을 고려하여 안테나 이용 주파수를 C-대역에서 Ku-대역으로 변경하는 방법을 채택하였다. 이에 따라 주파수변환기와 Ku-대역 안테나의 신규 설계 및 제작을 수행하고 지상에서 기능 검증까지 완료함으로써 유도무기 탑재 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 지상에서 정적 고도 측정을 주요 검증 방법으로 수행하였기 때문에 실제 유도무기가 비행하면서 겪게 되는 운용 환경을 모두 검증했다고 보기는 어렵지만 전파고도계의 기본기능과 성능을 확인하

였으며, 유도무기 탑재 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 유도무기 종합시험이나 항공기 탑재비행시험 등을 통해 다양한 지형에 대한 동적 운용 자료를 획득함으로써 안테나의 빔폭 축소로 인해 오차 성능이 향상됨을 검증할 필요가 있다. 비행 성능 검증 완료 후 유도무기 성능개량이나 신규 유도무기 개발에 적용하면 상대적으로 적은 비용을 들여 유도무기 종합 성능 향상에 크게 기여할 수 있으리라 기대된다.

References

- [1] Warren L. Stutzman, Gary A. Theile, "Antenna Theory and Design", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 275~354, 1998.
- [2] National Telecommunications and Information Administration, "United States Frequency Allocations", U.S. Department of Commerce, 1996.
- [3] MIL-STD-461E, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment", Military Standard Document, 1999.
- [4] 이성만, 이수창, 오현식, 성덕용, "탑재비행 시험을 이용한 유도무기탑재 장비의 시험평가", 한국항공우주학회지, Vol. 35, No. 1, pp. 72~78.