

논문 2017-54-5-12

공중폭발탄용 신관에 적용 가능한 초소형 지자기 지면감지 센서

(Miniaturized Ground-Detection Sensor using a
Geomagnetic Sensor for an Air-burst Munition Fuze)

이 한 진*

(HanJin LEE[©])

요 약

공중폭발탄은 소총용 탄으로 공간의 제약이 크기 때문에 탑재하는 신관의 크기와 탄약의 양에 제한이 있다. 제한된 양의 탄약으로 위력을 높이기 위해 표적의 위에서 지면 방향으로 공중폭발탄을 기폭시켜 화력을 집중하는 새로운 기법을 개발하였다. 본 논문은 1축 지자기 센서를 이용하여 공중폭발탄의 비행거리를 구하고 지면방향을 감지하는 초소형·저전력 지면감지 센서의 설계와 검증 방법에 대해 제시한다. 지면감지 센서를 설계하기 위해 회전하는 탄의 지자기 센서 모델을 분석하고 이 모델을 단순화하여 지면감지 알고리즘을 설계하였다. 공중폭발탄의 회전 환경을 모사하는 고속회전 시험치구를 제작하고 데이터를 획득하기 위한 지자기 센서와 원격측정 장치를 제작하여 지자기 데이터를 획득하고 이 데이터를 후처리하는 방법으로 지면감지 알고리즘을 검증하였다. 검증된 지면감지 알고리즘에 따라 소형·저전력을 고려하여 센서 일부를 아날로그 소자로 구현하고 나머지를 프로세서에서 프로그램으로 구현하여 지면감지 센서를 설계·제작하였다. 지면감지 센서의 출력신호를 육안으로 확인할 수 있게 LED에 연결하고 고속회전 시험치구에서 임의의 속도인 200 Hz로 회전시켰다. 고속카메라로 회전하는 지면감지 센서를 촬영하여 지면감지 출력신호가 발생한 시점을 지자기 센서 모델과 비교하여 검증하였다.

Abstract

An air-burst munition is limited in space, so there is a limit on the size of the fuze and the amount of ammunition. In order to increase a firepower to a target with limited ammunition, it is necessary to concentrate the firepower on the ground instead of the omnidirectional explosion after flying to the target. This paper explores the design and verification of a ground-detection sensor that detects the direction of the ground and determines the flight-distance of an air-burst munition using a single axis geomagnetic sensor. Prior to the design of the ground detection sensor, a geomagnetic sensor model mounted on the spinning air-burst munition is analyzed and a ground-detection algorithm by simplifying this model is designed. A high speed rotating device to simulate a rotation environment is designed and a geomagnetic sensor and a remote-recording system are fabricated to obtain geomagnetic data. The ground detection algorithm is verified by post-processing the acquired geomagnetic data. Taking miniaturization and low-power into consideration, the ground detection sensor is implemented with analog devices and the processor. The output signal of the ground detection sensor rotating at an arbitrary rotation speed of 200 Hz is connected to the LED (Light Emitting Diode) in the high speed rotating device and the ground detection sensor is verified using a high-speed camera.

Keywords : Geomagnetic sensor, Ground-detection sensor, Ground-detection algorithm

I. 서 론

* 정회원, 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

© Corresponding Author(E-mail : hanjine@add.re.kr)

Received ; February 28, 2017 Revised ; April 7, 2017

Accepted ; April 12, 2017

본 연구는 제한된 양의 폭약을 사용하는 탄에서 폭발 위력을 증대시키기 위한 방안으로 폭압 또는 파편이 방향성을 가지고 폭발할 때 폭발하는 방향이 지면을 향할

수 있도록 지면을 감지하는 센서의 개발을 목표로 한다.

소총에 적용되는 공중폭발탄은 엄폐 또는 은폐하고 있는 적을 공격하기 위해 표적에서 가까운 공중에서 폭발하여 폭압 또는 파편으로 표적에 피해를 가하는 20mm 급 소총용 탄이다^[1~2]. 공중폭발탄의 효과를 극대화하기 위해서는 표적과의 거리가 최소인 지점에서 공중폭발탄을 기폭시켜야 한다. 공중폭발탄의 발사체는 레이저 방식으로 표적까지 거리를 측정하고, 공중폭발탄은 이 거리 정보를 이용하여 기폭시점을 결정한다^[2~3]. 이때, 표적까지의 거리를 장입하는 방법은 공중폭발탄의 비행속도를 고려하여 시간으로 장입하는 방법과 한 회전 당 비행하는 거리를 고려하여 회전수로 장입하는 방법이 있다. 공중폭발탄의 발사 속도는 총열의 온도와 압력, 장약 양의 편차에 따라 달라지므로 동일 발사체를 이용해도 발사할 때마다 발사 속도의 편차가 존재한다. 그러므로 시간으로 장입하는 방법은 발사 속도에 의한 편차만큼 오차를 가진다. 회전수로 장입하는 방법은 공중폭발탄이 총열 내에 있는 강선을 지나면 생기는 회전을 이용하는 방식이다. 강선이 한 회전하는 길이만큼 포구를 나온 공중폭발탄도 한 회전동안 비행거리가 일정하게 정해진다. 그러므로 같은 발사체에서 발사된 공중폭발탄은 한 회전 당 비행하는 거리가 동일하고 발사체마다 강선의 편차가 작아 한 회전 당 비행거리의 편차도 작다. 이러한 이유에서 시간을 장입하는 방법보다 회전수를 장입하는 방법이 더 정확하다^[2~3]. 그러므로 공중폭발탄이 기폭되는 거리를 측정하기 위해 회전수를 측정할 수 있는 센서가 필요하다.

공중폭발탄은 포탄용 신관이나 유도탄용 신관에 비해 크기와 공급전력에서 제한이 크다. 공중폭발탄에 적용하기 위한 신관은 $\Phi 16\text{mm} \times 35\text{mm}$ 내에 모든 소자가 실장 되어야 한다^[2]. 공중폭발탄용 신관은 전원공급부와 신호처리부, 탄을 기폭 시키기 위한 장전기폭부를 포함하고 지면감지를 추가해야 하므로 지면감지 센서는 초소형으로 설계해야 한다. 그리고 공중폭발탄용 신관을 구동하는 전력은 발사 전에 장입 받은 유도기전력을 커패시터에 충전하여 사용한다^[4]. 유도기전력의 전송 효율이 약 1% 정도이고 장입 받는 시간이 3ms~6ms로 매우 짧기 때문에 사용할 수 있는 전력이 부족하다^[4~5]. 이러한 이유로 지면감지 센서는 저전력으로 구동이 가능해야 한다. 공중폭발탄은 앞서 설명하였듯이 소총용 탄으로 병사용 개인화기 탄약이다. 그러므로 저비용으로 대량생산이 가능해야 한다. 이러한 요구조건들을 만족하기 위해 공중폭발탄용 신관은 초소형, 저전력 및

저비용을 고려하여 설계해야 한다. 그러므로 여러 센서를 사용하거나 크기가 큰 센서 또는 주변회로가 복잡한 센서의 사용이 불가능하다.

최근에는 동일한 양의 폭약으로 공중폭발탄의 위력을 증대시키기 위해 지면방향으로 폭압 또는 파편을 집중시키는 연구가 요구되고 있다^[6]. 이를 구현하기 위해 지면방향을 감지할 수 있는 방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 롤 각을 추정하는 방법은 포탄용 신관의 항법을 위해 많이 연구되고 있다. 항법용 롤 각 추정 기법은 관성좌표계에서 신관의 회전각을 의미하므로 지면방향을 감지하는데 이용할 수 있다. 롤 각을 추정하기 위한 노력으로 위성항법시스템(GPS, Global Positioning System) 또는 위성항법시스템과 관성항법장치를 함께 이용하는 방법이 연구되었지만 시스템이 크고 연산이 복잡하며 비싸기 때문에 공중폭발탄에 적용할 수 없다^[7~8]. 위성항법시스템 이외에 위성항법시스템보다 저비용이면서 초소형으로 제작이 가능한 열전퇴(Thermopile)를 이용하여 롤 각을 추정하는 방법도 연구되었다^[9]. 그러나 열전퇴는 기후에 따라 출력의 편차가 있고 적용 시스템에 적절한 관측시야(FOV, Field Of View)도 고려하여 설계해야 하기 때문에 공중폭발탄에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

지자기 센서 또한 회전하는 탄의 롤 각을 추정하는 센서로 많이 연구되고 있다^[2~3, 10~11]. 이중에 Rouger는 3축 지자기 센서를 이용하여 포탄의 발사 전 초기 자세와 지자기 센서 값을 비교하여 지자기 방향을 미리 계산하고 비행 중 지자기 센서의 출력을 이용하여 포탄의 자세를 추정하는 방법에 대해 소개하였다^[10]. 이렇게 3축 지자기 센서를 이용하는 방법은 롤 각 뿐만 아니라 탄의 자세(롤 각, 피치 각, 요 각)를 추정할 수 있어 매우 유용하다. 하지만 공중폭발탄은 임의의 자세로 장전되기 때문에 3축 지자기 센서만으로는 발사 전의 초기 자세를 알 수 없다. 이를 해결하기 위한 방안으로 발사 전에 발사체에서 중력 방향 대비 지자기 센서의 롤 각, 피치 각, 요 각을 장입해 주는 방법도 있으나 공중폭발탄은 발사 직전 격발 장치가 움직이는 짧은 순간에 에너지와 회전수 정보를 장입받기 때문에 장입 받는 데이터의 길이에도 한계가 있어 자세 정보를 장입 받는 것이 불가능하다^[5]. 그러므로 공중폭발탄에 3축 지자기 센서와 초기 자세를 이용하여 지면을 추정하는 방법은 공중폭발탄에 적용할 수 없다.

본 논문은 지자기 센서의 1축 정보를 이용하여 회전수를 감지하는 것과 함께 기폭지점에서 지면을 감지하

는 방법에 대해 제시 한다. 원통형 탄두 또는 탄약에서 편심 기폭을 하면 전방위로 방사되어 파편의 속도가 균 일한 중심 기폭과 달리 방사 방향에 따라 파편의 속도가 달라진다^[12]. 편심 기폭을 했을 때 지면에서 $\pm 60^\circ$ 내 에 방사하는 파편의 속도는 수평방향(90°)의 파편 속도 대비 10% 이상 빠르다^[12]. 동일한 크기와 무게의 파편 은 속도가 빠를수록 살상력이 높기 때문에 이 범위 내 에서 기폭하는 것이 중요하다. 본 논문에서 제시하는 지면감지 방법은 이 범위를 만족한다. 이 방법을 이용 하여 설계한 지면감지 센서는 회전수 측정과 지면감지 기능에 최적화된 지면감지 알고리즘을 이용하여 $\Phi 16\text{mm}$ 회로기관 내에 주변회로와 프로세서가 실장 되도록 설 계하였다. 지면감지 센서를 설계하기에 앞서 지면감지 알고리즘은 지자기 센서 모델을 단순화하여 최적화된 방법으로 회전수 측정과 지면감지가 가능하도록 설계하 였다. 제작한 지자기 센서에서 획득한 데이터를 이용하 여 지면감지 알고리즘을 검증하고 이를 토대로 지면감 지 센서를 설계하였다. 추가로 발사환경을 모사할 수 있는 고속회전 시험치구를 제작하여 지면감지 센서를 검증하였다.

II. 지면감지 알고리즘

1. 지자기 모델

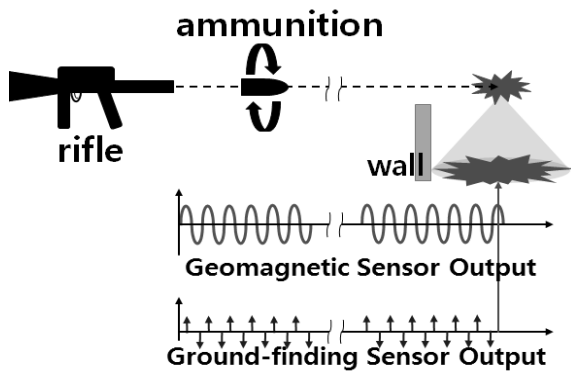


그림 1. 지면감지 근접신관의 운용 개념도
Fig. 1. Operating principle of turn-counting and down-finding proximity fuze.

그림 1은 공중폭발탄용 지면감지 센서의 운용 개념 도를 나타낸다. 지면감지 센서는 발사 후 지자기를 측 정하여 회전수를 측정하고 한 회전 당 비행하는 거리를 측정한 회전수와 곱하여 기폭 지점에 도달하였는지 판 단한다. 기폭 지점에 도달하면 지자기 파형을 계산하여 지면방향을 찾고 출력신호를 발생한다. 공중폭발탄용

신관은 지면감지 센서의 출력신호를 인식하여 공중폭발 탄을 기폭한다.

회전하는 공중폭발탄에서 측정된 지자기 신호를 이 용하여 회전수를 측정하는 방법과 지면을 탐지하는 방 법을 설명하기 위해 지자기 모델을 구체적으로 기술한다. 소형·저전력을 고려하여 이 모델을 단순화하고 지면감 지 센서의 알고리즘을 최적화하는 방법을 설명한다.

그림 2는 지자기(\vec{B}), 자북(\vec{B}_{xy}), 지자기와 자북 사 이의 각(ϕ), 탄의 진행방향(X), 자북과 탄의 진행방향 사이의 방위각(ρ), 지면방향(Z), 지자기를 YZ 평면에 정사영한 지자기 벡터(\vec{B}_{yz}), 지면방향과 YZ 평면에 정 사영한 지자기 벡터 사이의 수직편향각(α), 지자기 센 서의 측정축(\vec{S}) 및 지자기 센서의 측정축과 YZ 평면에 정사영한 지자기 벡터 사이의 측정각(θ)을 나타낸다. 그림 2 (c)에서 알 수 있듯이 지면방향은 YZ 평면에 정 사영한 지자기 벡터를 측정하고 수직편향각만큼 보상해 주면 찾을 수 있다.

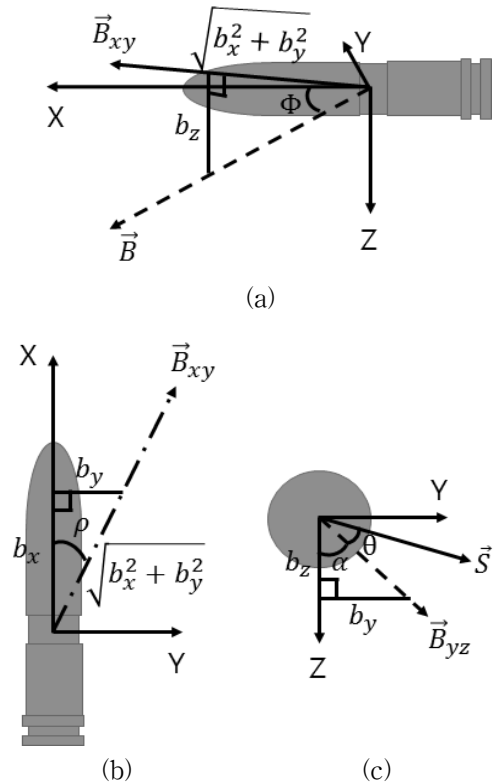


그림 2. 좌표계 정의 (a) 측면 (b) 윗면 (c) 뒷면
Fig. 2. Coordinate definition (a) Side view (b) Top view (c) Rear view.

수직편향각과 지자기 사이의 관계를 수식으로 정리 하기 위해 지자기를 식 (1)과 같이 표현하면

$$\vec{B} = (b_x, b_y, b_z) \quad (1)$$

수직편향각과 지자기 사이에는 식 (2)의 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{b_y}{b_z} \quad (2)$$

복각은 그림 2 (a)와 같이 식 (3)으로 표현할 수 있고

$$\tan \phi = \frac{b_z}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2}} \quad (3)$$

방위각은 그림 2 (b)와 같이 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\sin \rho = \frac{b_y}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2}} \quad (4)$$

그러므로 식 (3)과 식 (4)를 정리하여 식 (2)에 대입하면 복각과 방위각으로 표현되는 수직편향각을 구할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \rho}{\tan \phi} \right) \quad (5)$$

식 (5)는 수직편향각이 복각과 방위각에 의해 결정됨을 의미한다. 그러므로 정확한 수직편향각을 계산하기 위해서는 복각과 방위각을 알아야 한다. 복각과 방위각을 알기 위해서는 3축 지자기 센서로 측정 Z축을 지면 방향으로 일치 시킨 뒤 3축 지자기 값을 모두 측정해야 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다. 하지만 공중폭발탄은 발사 전 임의의 자세로 장전되기 때문에 3축 지자기 센서를 이용하더라도 복각과 방위각을 계산할 수 없다. 그러므로 운용환경에 맞게 모델을 단순화하여 문제를 해결해야 한다.

방위각은 발사 방향에 따라 달라지므로 $0^\circ \sim 360^\circ$ 중 어떤 값을 가질 수 있고 복각은 지역에 따라 달라지는 값으로 상수이다. 그러므로 특정 지역의 복각에서 방위각에 따라 수직편향각이 어떻게 변하는지 먼저 살펴본다. 식 (5)에서 방위각에 따라 $\sin \rho$ 가 가질 수 있는 최대와 최소 범위는 1과 -1이다. 그리고 대한민국에서의 복각은 지역에 따라 48.5° 과 54.5° 사이의 값을 가진다^[13]. 예를 들어 복각이 54.5° 인 지역에서 식 (5)를 이용하여 수직편향각을 구하면, 방위각이 0° 일 때 수직편향각은 0° 이 되고 방위각이 90° 로 증가함에 따라 수직편향각은 35.5° 에 가까워진다. 방위각이 90° 에서 180° 로 증가할수록 수직편향각은 0° 에 가까워지고 방위각이 180° 에서

270° 로 증가하면 -35.5° 에 가까워진다. 마지막으로 방위각이 270° 에서 360° 로 증가할수록 수직편향각은 0° 에 가까워진다. 그러므로 복각이 54.5° 인 지역에서는 임의의 방위각에서 지자기 센서를 롤 회전시키며 지자기를 측정하더라도 수직편향각이 $\pm 35.5^\circ$ 내에서 \vec{B}_{yz} 를 측정할 수 있다. 마찬가지로 48.5° 지역에서 지자기 센서를 롤 회전시키며 지자기를 측정하면 수직편향각이 $\pm 41.5^\circ$ 내에서 \vec{B}_{yz} 를 측정할 수 있다. 이러한 관계는 그림 2 (c)를 참조하여 다음의 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$|\vec{S}| = |\vec{B}_{yz}| \cos \theta \quad (6)$$

여기서, $|\vec{S}|$ 는 1축 지자기 센서에서 측정되는 지자기의 크기이고 $|\vec{B}_{yz}|$ 는 지자기의 크기를 의미한다. θ 는 앞서 기술하였듯이, \vec{S} 와 \vec{B}_{yz} 사이의 각을 의미한다.

식 (6)에서 알 수 있듯이 지자기 센서의 측정 최대값 발생 지점은 지자기 벡터 방향과 일치하는 지점이고 이 지점은 복각이 $48.5^\circ \sim 54.5^\circ$ 인 지역에서 지면방향 대비 $\pm 41.5^\circ$ 내에 있음을 알 수 있다. 이 범위는 서론에서 설명한 수평방향 대비 파편 속도가 10% 이상 높은 지점으로 이 범위 내에서 기폭하면 편심 기폭하는 탄의 살상력을 증가시킬 수 있다.

2. 지면감지 알고리즘

지자기 모델의 분석을 통해 알고리즘을 지자기의 최대값이 발생하는 시점을 찾는 것으로 단순화하였다. 일례로, 최대값을 찾기 위해서는 측정되는 값을 일일이 비교하여 최대값이 발생한 이후에 최대값 발생지점을 찾을 수 있으나 그 값을 일일이 비교하기 때문에 연산량이 많아져 전력소모가 상대적으로 크다. 본 절에서는 일정한 속도로 회전하는 탄에서 측정되는 지자기의 특징을 이용하여 연산량을 축소하여 최대값이 발생하는 시점을 찾는 방법에 대해 제시하고 이 방법을 이용하여 지면감지 알고리즘을 설계한다. 그리고 비행거리를 계산하기 위한 회전수 측정방법도 함께 설명한다.

지자기 센서의 출력은 식 (6)에서 표현하였듯이 공중폭발탄이 회전함에 따라 정현파 신호로 측정된다. 지자기 최대값을 효율적으로 찾기 위한 방안으로 정현파를 이진신호(Binary signal)로 변경하는 방법을 제안한다. 정현파는 최대값을 중심으로 좌우가 대칭이므로 문턱값(Threshold) 이상의 신호를 1로 변경하고 문턱값 미만의 신호를 0으로 표현하면 0에서 1로 변화하는 상승구간(Rising Edge)과 1에서 0으로 변화하는 하강구간

(Falling Edge)의 가운데가 정현파의 최댓값이 된다. 그러므로 알고리즘을 상승구간과 하강구간이 발생하는 시점을 트리거(Trigger)로 하여 동작시킨다.

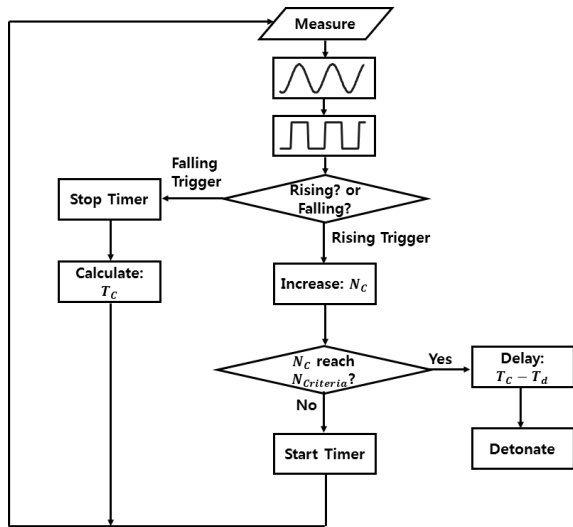


그림 3. 지면감지 센서 동작 순서도
Fig. 3. Operation sequence of ground-finding sensor.

그림 3은 지면감지 센서의 동작 순서도를 나타낸다. 입력 트리거 신호(Input: trigger)가 상승구간이라면 회전수 카운터(N_c)를 증가시켜 공중폭발탄이 한 회전을 감지한다. 만약 회전수 카운터가 장입받은 회전수($N_{Criteria}$)에 도달하면($N_c \text{ reach } N_{Criteria}$) 지연시간 만큼 지난 후에 탄을 기폭시킨다(Detonate). 지연시간은 상승구간과 하강구간 사이 시간의 절반(T_c)에서 시스템에 의한 지연시간(T_d)만큼 보상한 시간이다. 여기서 시스템에 의한 지연시간인 T_d 는 지자기 센서부터 주변 회로를 거쳐 프로세서에서 알고리즘 수행을 완료하기까지 걸리는 시간을 의미한다. 만약 회전수 카운터가 장입 받은 회전수에 도달하지 않았다면 지연시간을 계산하기 위한 타이머를 동작시킨다(Start Timer). 입력 트리거 신호가 하강구간이면 타이머를 중지시키고 식 (7)을 이용하여 지연시간을 계산한다.

$$T_c[n] - T_d = \frac{|T_f[n-1] - T_r[n-1]|}{2} - T_d \quad (7)$$

여기서, T_c 는 상승구간에서 예상한 최댓값 발생지점을 찾기 위한 지연시간을 의미하고 T_d 는 시스템에 의한 내부 지연시간으로 미리 측정된 상수이다. T_f 과 T_r 은 각각 상승구간 발생시점과 하강구간 발생시점의 시간을 의미하고 괄호 안의 n 은 n 번째 회전을 의미한다.

$n-1$ 은 n 번째보다 한 회전 전의 회전을 의미한다.

지자기 모델을 통해 방위각, 복각과 수직편향각의 관계를 정리하고 이 모델을 단순화하여 지면감지 알고리즘을 설계하였다. 다음 절에서 지면감지 알고리즘을 시뮬레이션으로 검증하기 위해 데이터 획득용 지자기 센서와 발사 환경을 모사하기 위한 고속회전 시험치구 제작에 대해 설명한다.

III. 시뮬레이션

1. 고속회전 시험치구

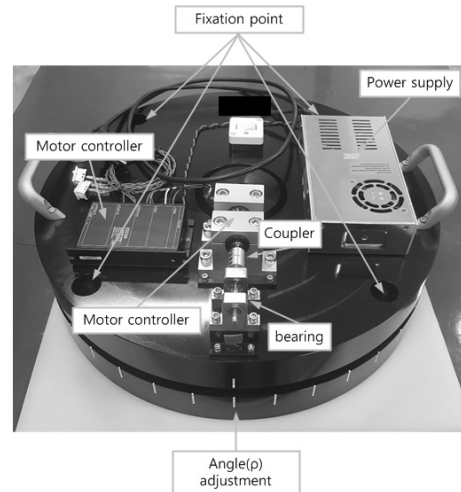


그림 4. 고속회전 시험치구
Fig. 4. Picture of high speed rotating device.

고속회전 시험치구는 공중폭발탄의 발사 환경과 유사하게 지자기 센서와 지면감지 센서를 회전시켜 지자기 데이터 획득 및 지면감지 센서를 검증하기 위한 목적으로 제작한 장치이다.

그림 4는 제작한 고속회전 시험치구를 나타낸다. 고속회전 시험치구는 크게 두 부분으로 분리되어 있다. 아랫부분에는 10° 간격으로 고정용 구멍(Fixation point)이 있어 윗부분을 회전시키고 고정을 할 수 있게 하였다. 그러므로 초기에만 고속회전 시험치구를 자북 방향으로 설치하면 방위각을 10° 간격으로 변화시키며 데이터 획득과 검증 시험을 수행할 수 있다.

모터는 BLDC(Brushless DC) 모터를 사용하였다. 사용한 모터는 공칭 속도(Nominal speed)가 62,200 rpm로 시험에 필요한 회전속도인 30,000 rpm을 만족한다^[2]. 고속회전 시험치구는 모터와 모터를 제어하기 위한 모터 제어기와 모터와 모터 제어기에 전원을 공급하기 위한 전원공급기를 포함한다. 지자기 센서 회로를 고정하는

축(고정 축)을 모터 축과 분리하기 위해 기계적 커플러를 사용하였다. 축 분리는 회전체의 축이 어긋나 발생하는 편심회전 또는 진동이 모터에 전달되어 모터가 손상되는 것을 방지하는 역할을 한다. 고정 축은 두 개의 베어링에 의해 지지되고 회전을 한다.

2. 지자기 센서

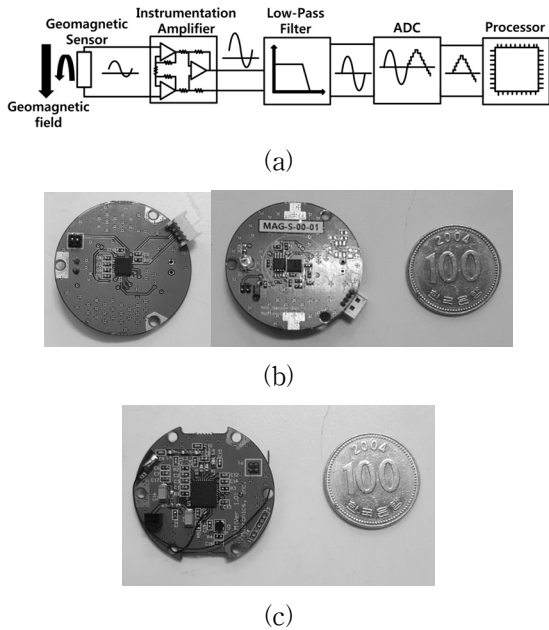


그림 5. 데이터 획득 장치 블록도 (a) 지자기 센서 회로도 (b) 제작한 지자기 센서 회로보드 (c)원격측정 장치 송신모듈 회로보드

Fig. 5. Acquisition apparatus block diagram (a) Geomagnetic sensor circuit block diagram (b) Photo of geomagnetic sensor circuit board (c) Photo of remote-recording tx module board.

지자기 센서는 지면감지 알고리즘을 시뮬레이션으로 검증하기 위해 필요한 지자기 데이터를 획득하기 위해 제작한 센서 보드와 원격측정 장치이다. 그림 5 (a)는 지자기 센서의 회로도를 나타낸 구성도이고 그림 5 (b)는 제작한 지자기 센서 회로 보드이다. 한반도 주변의 지자기 크기는 0.05 mT로 매우 작은 신호이므로 지자기 센서 회로는 지자기 신호를 증폭하기 위한 증폭기를 추가하였다. 고주파 노이즈를 제거하기 위한 저역통과 필터와 지자기 측정값을 컴퓨터에 기록하기 위한 아날로그-디지털 변환기로 구현하였다.

지자기 신호를 증폭하기 위한 증폭기로 계측 증폭기를 사용하였다. 계측 증폭기는 차등 증폭기로서 3개의 연산 증폭기로 구성된다. 계측 증폭기는 DC 오프셋과 측

정 잡음이 작고, 입력단에 있는 두 개의 연산 증폭기가 버퍼 역할을 함으로써 입력 임피던스가 높고 공통모드 제거비도 높아 지자기 출력을 5배 증폭하는 용도로 사용한다. 증폭된 신호는 1,024 Hz의 저역 통과필터를 거쳐 고주파 노이즈를 감쇄시켰다. 아날로그 디지털 변환기를 거쳐 프로세서로 입력된 지자기 측정값은 원격측정 장치로 전달되어 무선데이터 통신을 통해 외부의 컴퓨터에 저장된다.

회전하는 시스템에서 슬립링 등을 이용하여 데이터를 획득하는 방법과 메모리에 기록한 뒤 시험 종료 후 메모리로부터 데이터를 읽어오는 방법도 있으나, 슬립링을 이용하는 방법은 고속으로 회전하는 시험 환경에서 데이터 손실의 우려가 있고 메모리에 기록하는 방식은 실시간으로 데이터 확인이 불가능하다는 단점과 메모리 크기에 데이터 획득 시간이 영향을 받는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 RF 방식으로 데이터를 전송하는 소형의 원격측정 장치를 그림 5 (c)와 같이 제작하였다.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 지면감지 센서의 동작 순서도를 나타내는 그림 3에서 발사 이후부터 기폭까지 수행하였다.

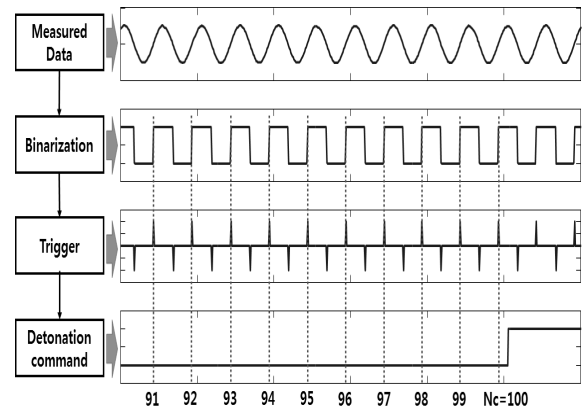


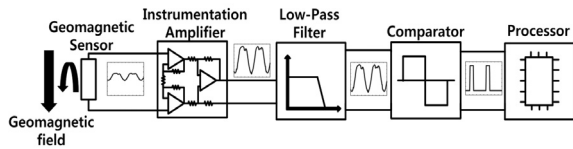
그림 6. 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result.

시뮬레이션에 사용할 지자기 측정 데이터를 획득하기 위해 지자기 센서를 고속회전 시험치구에 장착하여 임의의 회전 속도인 100 Hz로 회전시켰다. 그림 6은 획득한 데이터의 일부를 나타낸다. 여기서 획득한 데이터는 그림 5 (a)의 ADC 데이터에 해당된다. 알고리즘에서 설명하였듯이 획득한 지자기 신호는 이진 신호로 변화시켜 상승구간과 하강구간으로 나누었다. 그림 6의

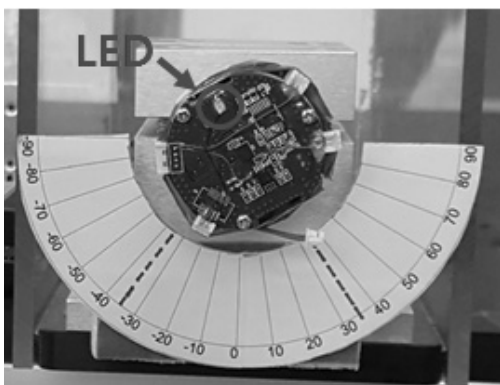
기폭명령은 그림 3에 설명된 지면감지 알고리즘의 결과이다. 상기 결과는 시뮬레이션이므로 식 (7)에서 상승구간과 하강구간의 중간지점을 찾기 위한 지연시간인 T_c 는 계산을 하였고 시스템 지연시간을 의미하는 T_d 는 0으로 하였다. 20개의 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 식 (7)을 이용하여 구한 T_c 는 실제 최댓값 발생지점 대비 평균 0.55%, 표준편차 0.04%의 오차를 보였다. 이 오차를 각도 오차로 표현하면 평균 1.98°, 표준편차 0.15°로 나타낼 수 있다. 기폭명령 발생 시점은 임의의 회전수인 100회로 정하였다. 지면감지 알고리즘은 상승구간을 100회 측정하여 그림 6에서와 같이 100번째 상승구간과 하강구간의 사이에서 기폭명령을 발생시킨 것을 알 수 있다. 실제 운용 환경에서는 발사체가 표적과의 거리를 측정하고 이 거리를 회전수로 환산하여 공중폭발탄에 장입한다. 그러므로 입력된 회전수에서 기폭명령을 발생시키는 것이 중요하다.

IV. 지면감지 센서 설계와 검증

1. 지면감지 센서 설계



(a)



(b)

그림 7. 알고리즘 검증용 회로와 방위각 ±90°에서의 LED 동작지점 표시선

Fig. 7. Evaluation board and marker lines that indicate LED operating point.

지면감지 센서는 그림 5 (a)에서 나타난 지자기 센서에서 아날로그-디지털 변환기를 제거하고 프로세서의

연산량을 줄이기 위해 비교기를 추가하여 그림 6의 이진신호 변환 과정까지 아날로그 회로로 구현하여 그림 7 (a)와 같이 설계하였다. 그러므로 지면감지 센서 프로세서는 그림 3에서와 같이 입력으로 상승구간과 하강구간의 트리거 신호만 입력으로 받으면 된다.

지면감지 센서의 회로에 의한 지연시간과 알고리즘에 의한 지연시간을 측정하기 위해 센서 출력단에 임의로 정현파를 인가하고 기폭 신호 발생 시점을 측정하였다. 두 신호를 비교하여 시스템에 의한 지연시간을 구하고 식 (7)을 이용하여 알고리즘에서 보상하였다.

제작한 지면감지 센서를 검증하기 위한 방안으로 기폭 시점을 시각적으로 표현하고 고속카메라로 촬영하는 방법을 사용하였다. 기폭 시점을 시각적으로 나타내기 위해 그림 7 (b)와 같이 지면감지 센서 내에 LED를 지자기 센서의 측정 축과 일치하는 가장가리에 부착하였다. LED는 지면감지 센서의 기폭 출력을 받아 점등되도록 구성하였기 때문에 LED 점등 지점은 식 (5)에서 구한 수직편향각과 일치해야 한다. 이를 확인하기 위해 그림 7 (b)와 같이 흰색 각도기를 추가하였다. 각도기의 빨간 점선은 방위각이 각각 ±90°이고 시험장소의 북각인 54°일 때 식 (5)에 의해서 계산된 수직편향각인 ±36°를 표시한 선이다.

2. 지면감지 센서 검증

제작한 지면감지 센서를 검증하기 위하여 고속회전 시험치구와 고속카메라를 이용하였다. 고속회전 시험치구의 회전 속도는 임의의 속도인 200 Hz로 하였고 고속카메라가 바라보는 방향을 기준으로 반시계 방향으로 회전시켰다. 고속카메라의 촬영 속도는 4,000 Hz로 고속회전 시험치구가 1회전할 때 20 프레임을 촬영하였다. 그러므로 영상의 각도 분해능은 18°이다. 고속카메라는 주변의 조도가 밝아질수록 촬영 속도를 높일 수 있다. 그러므로 실내에서 서치라이트를 이용하여 주변의 조도를 높인 뒤 시험을 수행하였다.

시험 절차는 다음과 같다. 우선, 지면감지 센서의 방위각이 0°가 될 수 있게 고속회전 시험치구를 자북 방향으로 향하게 설치한다. 방위각이 0°일 때는 식 (5)에 의해 수직편향각이 0°이고 LED는 그림 7 (b)의 흰색 각도기가 '0'을 지시하는 방향에서 점등되어야 한다. 이렇게 방위각 0°에서 지면감지 센서의 정확도를 검증한 다음, 고속회전시험 치구를 방위각이 각각 ±90°가 되게 설치한 후 시험을 수행하여 앞에서 설명한 빨간색 점선에서 LED가 점등되는지 확인한다.

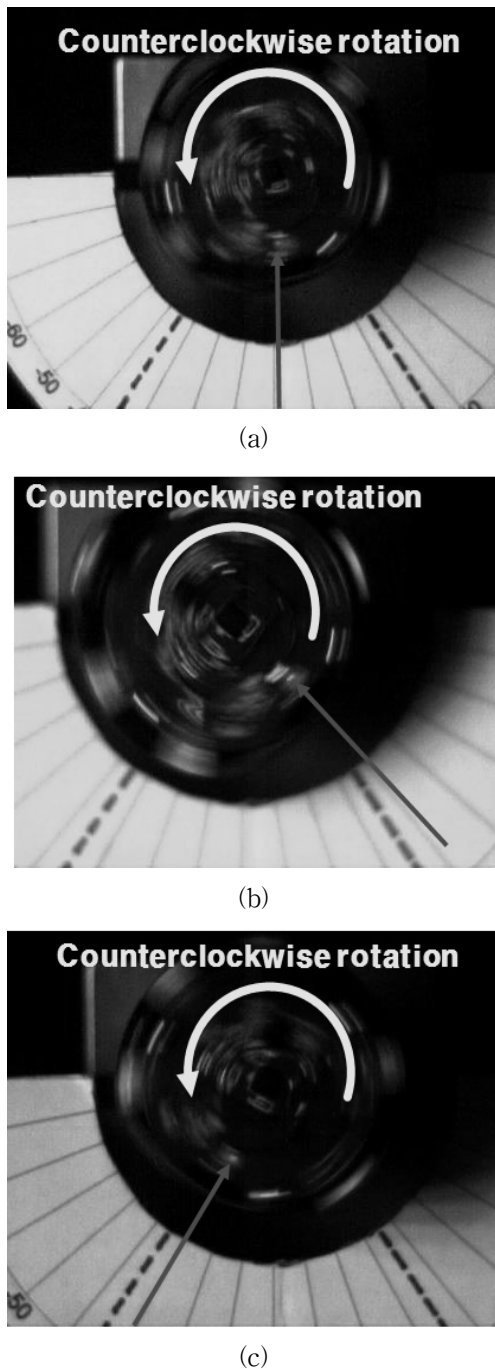


그림 8. LED를 이용한 알고리즘 검증시험 결과 (a) 방위각 0° 실험 결과 (b) 방위각 90° 실험 결과 (c) 방위각 -90° 시험결과

Fig. 8. The verification result of the algorithm using the LED (a) When ρ is 0° (b) When ρ is 90° (c) When ρ is -90°.

그림 8은 고속회전 시험 결과를 나타낸다. 그림 8 (a)는 방위각이 0°(자북 방향)일 때 지자기를 이용한 지면감지 센서의 시험결과를 나타낸다. 지면감지 센서가 반시계 방향으로 회전하고 고속카메라의 촬영 속도에 의한 영상의 각도 분해능이 18°이므로 흰색 각도기의 0°

가 되는 지점부터 오른쪽으로 18° 내에서 LED가 점등되어야하는데 그림 8 (a)에서 확인할 수 있듯이 이 범위 내에서 점등된 것을 확인할 수 있다. 반복 시험을 통해 10° 이내에서 LED가 점등되는 것을 확인하였다. 그림 8 (b)와 (c)는 각각 방위각이 $\pm 90^\circ$ 일 때 지면감지 센서의 시험 결과를 나타낸다. 앞에서 설명한 것과 마찬가지로 반복 시험을 통해 빨간색 점선의 10° 내에서 LED가 점등되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 설계한 지면감지 센서는 오차를 고려할 때 식 (5)를 통해 수직편향각을 계산한 결과와 일치하고 편심 기폭에 의해 파편 속도가 10% 이상 증가하는 지면방향을 감지하여 탄을 기폭시킬 수 있다.

V. 결 론

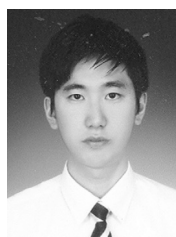
1축 지자기 센서를 이용하여 공중폭발탄용 초소형·저전력 지면감지 센서를 설계하고 고속회전 시험치구를 제작하여 지면감지 센서의 성능을 검증하였다. 공중폭발탄이 회전할 때 측정되는 지자기 신호를 이진신호로 변화시켜 회전수 측정과 지면감지 알고리즘을 효율적으로 구현하였다. 공중폭발탄의 비행거리는 한 회전 당 비행하는 거리가 정해져 있으므로 측정된 회전수로 계산된다. 지면감지 알고리즘은 공중폭발탄에 적용된 지자기 센서 모델을 단순화하여 지자기 최댓값이 발생하는 지점을 찾는 것으로 단순화하였다. 고속회전시험 치구에서 획득한 데이터를 통해 지면감지 알고리즘을 시뮬레이션한 결과 입력한 회전수에서 기폭명령이 발생하였고 실제 최댓값 발생시점과 비교하여 오차는 평균 1.98°, 표준편차가 0.15°이었다.

지면감지 알고리즘의 일부를 아날로그 회로로 구현하고 지면감지 센서가 $\phi 16\text{mm}$ 기관 내에 실장될 수 있도록 제작하였다. 제작한 지면감지 센서의 출력신호를 LED로 연결하고 고속회전 시험치구로 지면감지 센서를 회전시켜 LED의 점등을 고속카메라로 촬영하였다. 시험 결과 방위각 0°, 90°, -90°에서 지자기 센서 모델을 이용하여 계산한 수직편향각과 LED가 점등되는 지점이 10° 내에서 일치하였다. 그러므로 편심 기폭을 할 경우 대한민국 지역에서 방위각과 관계없이 파편 속도가 10% 이상 높은 구간인 $\pm 60^\circ$ 내의 지면방향을 감지할 수 있다.

REFERENCES

- [1] T. Chung, K. Chang and B. Choi, "A Study on the Optimum Design of Duplex-Structure Fragmentation Projectile of HEAB," 2009 The Annual Conference of The Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 1254-1256, Jeju, Korea, August 2009.
- [2] S. Lee, J. Oh and Y. Lee, "Development of Miniaturized Magnetic Induction Sensor and Turns Measurement System for Air-bursting Fuzes," 2009 The Annual Conference of The Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 135-138, Jeju, Korea, August 2009.
- [3] S. Yoon, S. Lee, Y. Lee and J. Oh, "A Miniaturized Turn-Counting Sensor Using Geomagnetism for Detecting Flight Range of Ammunition," IEEE SENSORS, Vol. 2006, no. 6, pp. 1227-1230, Daegu, Korea, October 2006.
- [4] Y. Park, J. Roh, S. Lee, J. Ha and J. Oh, "A Study on Improving Transmission Efficiency of Inductive Setting Fuzes," 2016 The Annual Conference of The Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 889-890, Jeju, Korea, August 2016.
- [5] W. Yeo, E. Choi, J. Lee, H. Kim, J. Chae and S. Lee, "A Study on a Firing Trigger of Turns Count Fuze Setting," 16th Symposium on the Ground Weapon Systems, pp. 68-70, 2008.
- [6] H. Kang, H. Lee and J. Choi, "A study on the omnidirectional ground-detection method through the geomagnetic measurement in the rotating projectile," 2016 The Fall Conferences of The Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 201-202, Daejeon, Korea, November 2016.
- [7] D. J. Lucia, "Estimation of the Local Vertical State for a Guided Munition Shell with an Embedded GPS/Micro-Mechanical Inertial Navigation System, MS Thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1995.
- [8] J. Hong, D. Kim, C. Ryoo and C. Lee, "Roll Angle Estimation of a Rolling Airframe Using a GPS and a Roll Rate Gyro," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 43, no. 2, pp. 133-140, 2015.
- [9] J. Rogers, M. Costello and D. Hepner, "Roll Orientation Estimator for Smart Projectiles Using Thermopile Sensor," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 34, no. 3, pp. 688-697, May-June, 2011.
- [10] P. Rouger, "GUIDANCE AND CONTROL OF ARTILLERY PROJECTILES WITH MAGNETIC SENSORS," 23rd International Symposium on Ballistics, pp. 789-796, Tarragona, Spain, April 2007.
- [11] H. Lee, K. Kim, H. Park, C. G. Park and J. G. Lee, "Roll Estimation of a Smart Munition Using a Magnetometer Based on an Unscented Kalman Filter," AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, August 2008.
- [12] G. Huang, W. Li and S. Feng, "Fragment Velocity Distribution of Cylindrical Rings Under Eccentric Point Initiation," Journal of the Propellants Explos. Pyrotech., vol. 40, pp. 215-220, 2015.
- [13] K. Choi, Y. Shin and M. Lim, "A set of regression formulae for the geo-magnetic field of the southern part of the Korean Peninsula," Journal of the Geological Society of Korea, vol. 44, no. 3, pp. 301-314, 2008.

저 자 소 개



이 한 진(정회원)

2010년 가천의과학대학교 의공학과
학사 졸업.

2012년 한양대학교 지능형로봇 공학
과 석사 졸업.

2012년~현재 국방과학연구소 연구
원.

<주관심분야: 신호처리, 패턴인식, 근접센서>