

# 자계 차분형 센서를 이용한 초소형/고정밀 탄속 측정장치 개발

## Development of the Measuring Device of Muzzle Velocity using Magnetic Field Gradient Sensor

채 제 옥\*      김 종 천\*      최 의 중\*      이 영 신\*\*  
Chae, Je-Wook      Kim, Jong-Chun      Choi, Eui-Jung      Lee, Young-Shin

### ABSTRACT

In the conventional weapon system, such as gun and small arms, it is a general trend that for maximization of its performance and enhancement of its effectiveness, the firing control system(FCS) is developed and applied with the guns and small arms in the world. The FCS of the small arms for infantry man is composed of a few of sensors for acquisition of input data of FCS, such as range measurement, position sensing of weapon, temperature, etc., computer, displayer and power pack, and also the air burst munition is developed in parallel for the maximization of FCS's effectiveness. Since the flight time setting fuze for the air burst munition is adapted for next rifle, the measuring device of the muzzle velocity is needed to overcome the variation of muzzle velocity due to producing procedures and the differences of the using temperatures and so maintain the burst position accuracy. This paper contained the technical information on the development of the measuring device of muzzle velocity, which designed in compact & light weight configuration with reliability and accuracy.

주요기술용어 : Firing Control System(사격통제장치), Measuring Device(측정장치), Muzzle Velocity(탄속), GMFG Sensor(자계차분형센서)

### 1. 머리말

소화기(小火器) 분야에 있어서, 개인용 화기인 소총의 고유 성능을 극대화하려는 방안<sup>[1]</sup>과 기존 소총의

개념을 탈피하여 최신의 전자, 광학 및 센서기술을 적용한 공중 폭발탄약을 적용하는 새로운 개념<sup>[2,3]</sup>의 개인용 소화기를 개발하여 성능향상의 한계를 또 다른 방법으로 극복하려는 방안<sup>[4]</sup>을 추구하는 추세이다.

공중폭발을 위한 신관장입 방식으로는 크게 시한장입방식과 회전수설정방식으로 구분된다. 시한신관 장입방식 선정시 공중폭발탄의 정확한 폭발위치를 구현

\* 국방과학연구소 연구원

\*\* 충남대학교 기계설계공학과 교수

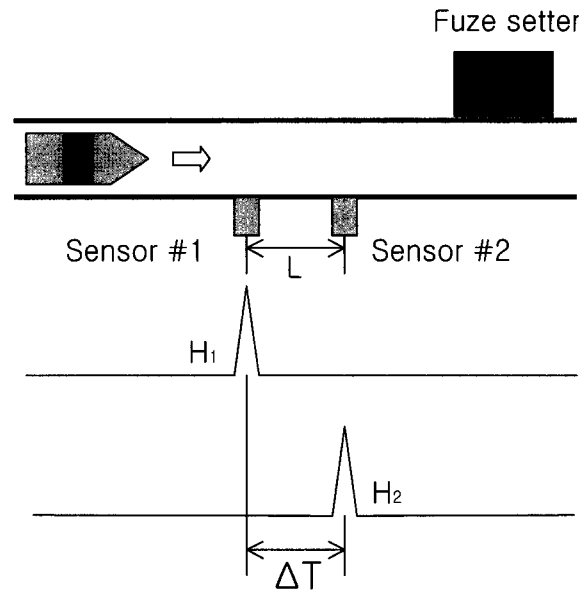
할 수 있도록 정확한 탄속정보를 필요로 한다.

일반적으로 화기의 탄약은 대기의 온도, 화기상태, 탄약제조공정 및 추진제 특성 등에 따라 총구 출발 탄속은 다르게 나타난다. 탄속 허용오차의 축소는 기술적으로 구현하기 어렵고, 생산비용이 과대하게 증가하며 또한 총기사용에 의한 총열의 마모상태 및 탄약 저장으로 인한 성능저하에 따라 탄속이 변화므로 근본적인 탄속 정확도를 구현하기는 불가능하다. 따라서 공중 폭발탄의 정확한 폭발위치를 장입할 수 있도록 하기 위하여 실시간 정밀 탄속측정장치의 개발 필요성이 도출되었다. 본 연구는 이러한 기능을 가지고 고신뢰성을 유지하며 제한된 공간내에서의 소형, 경량화된 고정밀의 탄속측정장치에 대한 독자적 개발에 관련된 내용이다.

## 2. 기술적 접근 방법

### 2.1 개요

소형경량화된 고정밀의 탄속 측정장치 개발을 목표로 요구되는 측정 정확도 및 화기에의 적용성을 만족할 수 있는 센서의 선정, 신호처리 방법 도출, 측정장치 설계 및 제작, 측정장치의 정확도 및 신뢰도 검증을 위한 시험 및 분석을 수행하였다. 일반적으로 공중폭발탄을 사용하는 화기 시스템에서에서 요구하는 최대 운용사거리에서의 탄두효과를 달성하기 위하여 탄속 측정장치의 측정오차는 기타 부체계(Subsystem) 및 부품에 의한 오차 등을 고려하여야 한다. 본 시스템에서는 기타 부체계 및 부품에 의한 오차를 고려하여 탄속 측정오차를 ±0.1%를 목표로 개발하였다. 이를 토대로 탄속 측정장치의 기본적 측정개념은 그림 1과 같이 제시되었다.



[그림 1] Fundamental measuring concept

그림 1에서 동일특성을 가지는 2개의 센서를 총구 전방에 길이방향 간격  $L$ 로 설치한다. 탄이 센서 부분을 통과하기 시작하면 센서의 출력은 기저 상태에서 여기 상태로 바뀌며, 탄이 통과 후 다시 기저 상태로 복원된다. 따라서 탄이 센서 설치부위를 통과 시 두 센서의 출력은 그림 1의  $H_1$ ,  $H_2$  펄스를 출력하게 되며, 두 펄스의 시간 간격을 측정하고 센서간 거리를 측정된 펄스 시간 간격으로 나누어 탄속을 계산한다.

$$V = \frac{L}{T} = \frac{L}{N\Delta t} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\Delta t$ 는 기본 클럭(Clock)의 주기이며,  $N$ 은 계측된 클럭(Counting Clock) 수이다. 사격통제장치 설계요구조건에 따른 탄속 측정장치를 포함하는 시한신관 시한설정에 소요되는 시간선(Time Line) 요구조건을 고려하여 탄속 측정장치의 2개의 센서 거리는 25mm의 간격을 가지도록 설계하였다.

2.2 설계요구조건 분석

설계요구조건에는 클럭 주파수, 인터페이스, 환경조건, 센서의 성능, 센서간 이격거리 등과 같은 요인들이 포함된다. 특히 센서간의 이격거리가 멀수록 측정 정확도는 향상되나 센서 설치 공간의 제한으로 25 mm 이내로 제한하였다. 센서간 이격거리는 정확히 측정되어야 하며 탄속측정에 있어서 ±0.1%의 정확도를 유지하기 위해 최대 ±25µm이내의 위치 정확도를 유지하는 것이 필요하다.

그러나, 센서간 이격거리에 의한 오차 이외의 요소를 고려할 때 최대 ±10µm 이내의 수준은 유지되어야 한다. 또한 센서를 붙인 장치대의 온도에 따른 변형은 위치 오차를 증대시킬 수 있으므로 가능한 한 열팽창 계수가 작은 재질을 사용해야 된다. 본 연구에서는 NVR사의 GMFG<sup>[5]</sup>(Giant Magneto-Resistive Magnetic Field Gradient) 센서를 선정하여 실험하였다. GMFG 센서 한개에는 두개의 GMR 센서가 0.5 mm 간격으로 장착되어 자계차분효과를 거둘 수 있다. 탄에는 원형 영구자석이 내장되는 것을 기본 설계안으로 하였다.

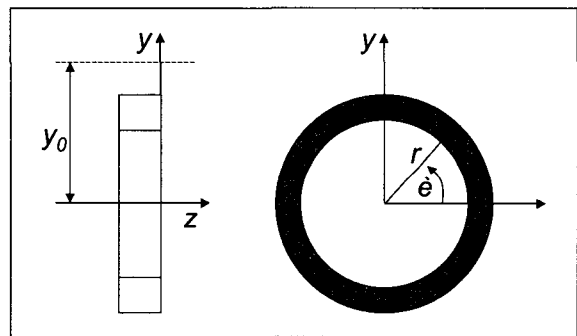
2.3 GMFG 센서의 자계감지 민감도

원형 영구자석 전후부 모두에 비자성체가 있을 경우 자계(Magnetic Flux) 분포에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 자계 분포의 계산은 다음 식<sup>[6,7]</sup>을 따른다.

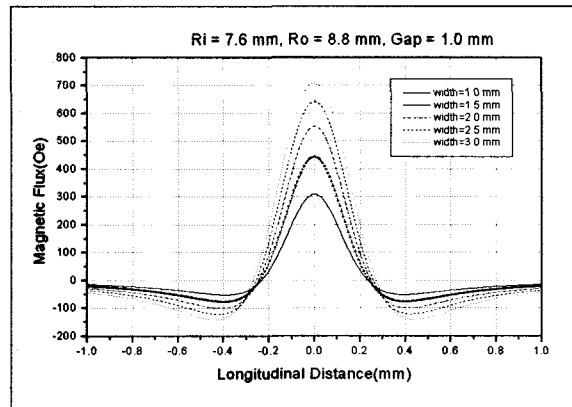
$$H_z = \left\{ \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{\frac{d_o}{2}}^{\frac{d_i}{2}} \frac{B_r r (l+z)}{\{r^2 + (l+z)^2 + y_0^2 - 2y_0 r \cos\theta\}^{3/2}} dr d\theta \right\} - \left\{ \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{\frac{d_o}{2}}^{\frac{d_i}{2}} \frac{B_r r z}{\{r^2 + z^2 + y_0^2 - 2y_0 r \cos\theta\}^{3/2}} dr d\theta \right\} \quad (2)$$

식 (2)에서  $H_z$ 는 z-방향 자계이며, 각 변수의 정의는 그림 2와 같다.  $y_0$ 는 원형 영구자석의 중심축에서 측정점이 있는 점선까지의 수직거리이며,  $d_o$ 와  $d_i$ 는 원형 영구자석의 외경과 내경이다.

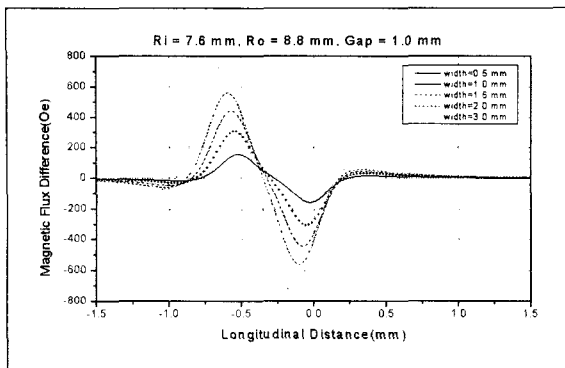
식 (2)를 이용한 모의계산 결과, 그림 3은 원형 영구자석의 내경, 외경, 간격(Gap =  $y_0 - [d_o/2]$ )을 일정하게 두고 링의 두께를 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm인 경우 계산한  $H_z$ 이다. 그림 3에서와 같이 원형 영구자석의 두께에 변화에 따른 자계의 차이는 그리 크지 않다. 그림 4는 그림 3의 자계를 가진 공간을 GMFG 센서가 지나갈 때 GMFG 센서의 출력을 계산한 결과이다.



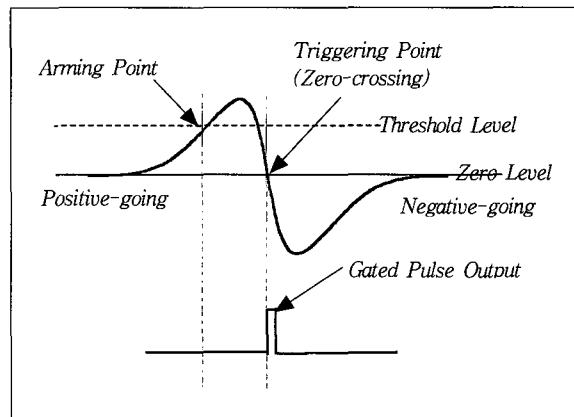
[그림 2] Definition of variables



[그림 3] Magnetic Flux according to width variation



[그림 4] Simulation results in view of width variation



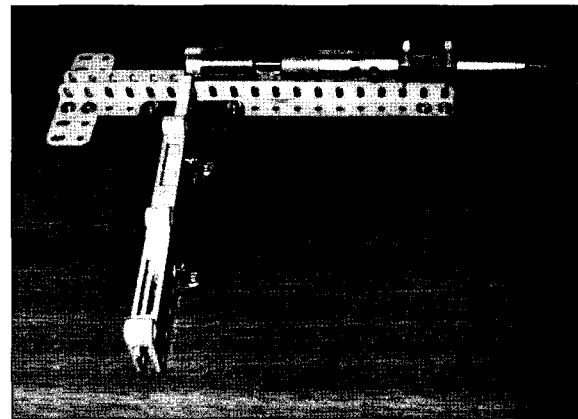
[그림 5] Functional diagram of LM1815

### 3. 탄속 측정장치 설계

#### 3.1 탄속 측정 회로 설계

원형 영구자석이 내장된 탄이 GMFG 센서 전방을 통과할 때 나타나는 원형 영구자석의 전방부 자계에 의해 GMFG 센서의 신호가 상승하다가 영점을 지나게(Zero-Crossing) 되며, Zero-Crossing 점의 정확한 인식을 시간지연이 최소이면서 라이징 시간(Rising Time)이 짧은 펄스를 출력하도록 하는 신호 처리 소자는 National Semiconductor사의 LM1815<sup>[8]</sup>를 선정하였다. LM1815는 그림 5와 같이 기본적으로 노이즈에 의한 Zero-Crossing의 민감도를 줄일 목적으로 준비(Arming)과 포착(Triggering) 기능을 갖추고 있다.

즉 Arming 이후의 Zero-Crossing만을 포착(Triggering)하며, 포착 이후 Arming을 원상태로 돌려놓는 방식으로 작동된다. 구체적으로 입력 신호가 정해진 Threshold Level을 Positive-Going 부분에서 지날 때 Arming을 하며, 다음의 Negative-Going Zero-Crossing에서 포착하여 Zero-Crossing 시점에서 펄스를 출력한다. 포착 후 다시 다음의 작동을 위

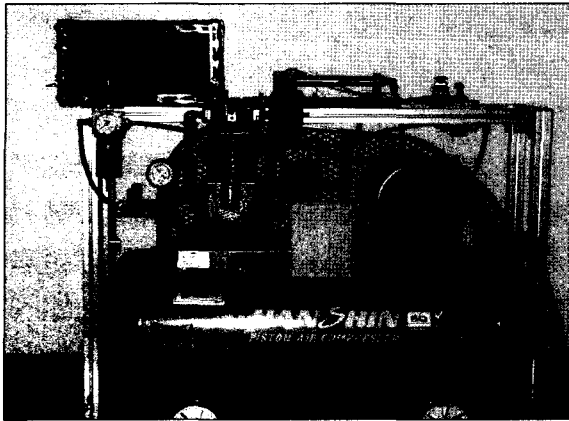


[그림 6] Experimental set-up in static condition

해 Arming은 원래 상태로 돌려지게 된다.

#### 3.2 탄속 측정장치 제작

탄속 측정장치의 개발을 위하여 단계별로 예비기능 시험을 수행하여 선정된 소자의 기능, 탄속 측정방안의 기술적 타당성을 각각 확인하였다. 각 단계별 예비 기능시험을 위하여 소요되는 부품들을 제작하였다. 우선 외경 20mm인 네오디뮴 재료 원형 영구자석을 시 제작하여 그림 6과 같이 수동식으로 이동시키며 자계 변화에 따른 GMFG 센서의 기능 및 출력신호 특



[그림 7] Experimental set-up in dynamic condition

성을 확인하였고, 실험실 내에서 시험이 가능하도록 그림 7과 같이 압축 공기를 이용한 저속발사 장치와 직경 20mm 탄체 및 원형 영구자석을 시제작하여 탄을 비교적 저속으로 방출함으로써 이동하는 탄의 탄속 측정신호의 검출 여부를 확인하였다.

탄속 수준이 유사한 40mm 고속유탄을 이용하여 실제 사격에 의한 탄속 측정시험을 중간 단계로써 수행하기 위하여 훈련용 40mm 고속유탄의 비활성 탄두를 수정가공하고, 외경 40mm인 네오디뮴 재료 원형 영구자석을 시제작하였다. 신관의 관성력 발전장치의 설계안이 확정된 후, 관성력 발전장치에 적용되는 제원의 원형 영구자석을 획득하고, 탄체 내부에 설치하여 탄속 측정장치의 기능시험을 수행하여 탄속 측정장치의 설계 및 기능 타당성을 확인하였다.

## 4. 기능 시험 및 평가

### 4.1 예비실험

#### 4.1.1 예비실험 I

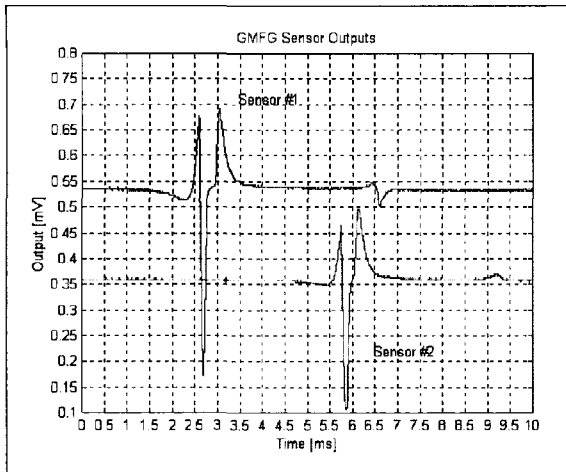
정적(Static) 상태에서 GMFG 센서 신호를 측정하

였다. 이 실험에 사용된 장치는 원형 영구자석을 삽입한 형태이며, 이 모의 탄을 GMFG 센서의 감지 방향으로 움직이면서 모의 탄의 움직인 거리와 GMFG 센서 출력간의 관계를 측정하였다. GMFG 센서와 모의 탄의 간격을 달리하면서 반복 실험하였다. 센서부착부위는 비자성체이며, 모의 탄의 위치와 GMFG 센서출력의 측정결과 간격이 좁을수록 기울기가 큰 zero-crossing을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 측정 정확도 요구조건인 0.1% 정확도와 비교하면, 두 센서의 간격이 25mm일 경우 두 센서간의 설치 및 센서의 오차의 총합이  $\pm 25\mu\text{m}$  수준이므로 gap이 2.0mm 이하일 경우 위치정밀도를 만족시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

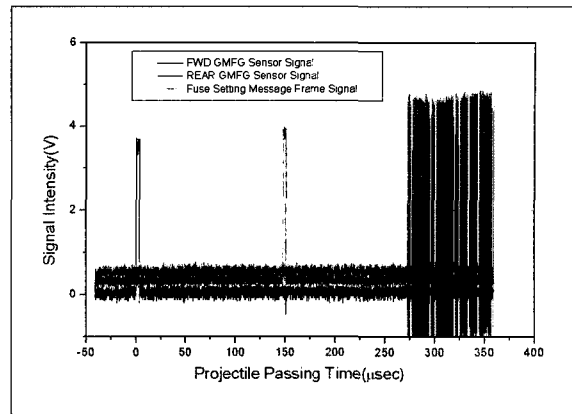
### 4.1.2 예비실험 II

예비실험 I에서 정적(Static) 상태에서의 신호 해석 결과 탄의 이동에 따른 GMFG 센서의 Zero-Crossing 점의 정확성이 입증되었다. 이러한 GMFG 센서의 특성이 동적(Dynamic) 상태에서도 유지되는지 확인하기 위해 수행하였다. 모의 탄을 내경이 20.3mm인 금속파이프 끝단에 넣고 압축공기를 순간적으로 보내 탄이 센서 앞을 지나도록 하였다.

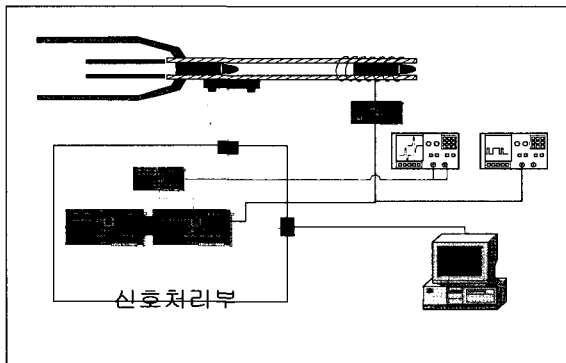
모의 탄이 GMFG 센서를 통과할 때 원형 영구자석과 GMFG 간의 간격을 좁게하기 위해 설치대 내경은 21mm, 센서를 붙이는 곳의 두께는 0.8mm로 하였다. 원형 영구자석의 외경이 20mm이므로 센서와 원형 영구자석의 간격은 0.8~1.8mm 범위이다. 두 센서는 약 24.5mm의 간격으로 설치하였다. 두 센서 출력의 Zero-crossing 점의 계측된 시간간격은 3.15ms이며 두 센서간의 간격이 약 24.5mm이므로 탄속은 약 7.7 m/s로 계산된다. 그림 8은 전형적인 GMFG 센서 출력신호이며, 노이즈에 의한 Zero-Crossing 오차는



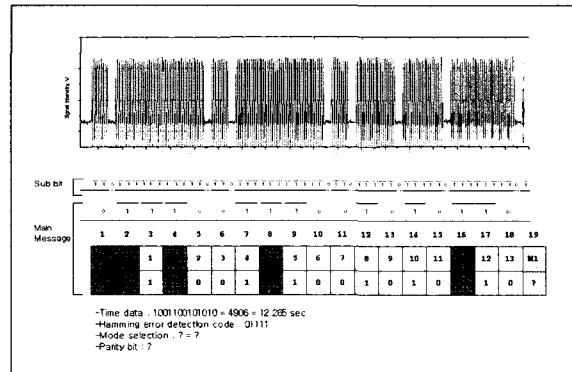
[그림 8] Typical output from sensor signal



[그림 10] Pulse signal and fuze setting message



[그림 9] Schematic of integrated test system



[그림 11] Signal of fuze setting message

$\pm 4.12\mu\text{m}$  이내이다. 이 오차는 속도측정 정확도 0.1%의 요구성능을 만족하기 위한  $\pm 24.5\mu\text{m}$ 를 충분히 만족시킬 수 있다. 그림 4와 비교하면 자계가 두 번 바뀌므로 파형이 두 번 발생하는 것을 볼 수 있다.

4.2 기술시험

실사격에 의한 탄속측정시험을 야외사격장에서 수행하였다. 시험에 소요되는 품목으로는 20mm 시험용 화기, 20mm 모의 시험탄, GMFG 센서 장착 총

구 장치대, GMFG 센서신호 증폭/변조 및 표시장치, 데이터 획득용 4 채널 오실로스코프(200MHz, Tectronix), Notebook PC, 이동형 속도측정기, 코일 감응형 속도측정기, 고속카메라(22,700pps) 등이다. 시험을 수행하는 구성은 그림 9와 같다.

본 기술시험을 수행하므로써 총구에서의 탄속측정 장치 및 측정된 탄속에 의한 시한정보 계산 및 출력 기능 등을 확인하였다. 시험결과로서 샘플간격 0.04  $\mu\text{s}$ 로 수행하였을 때 탄속은 170.49m/s, 시한은 12.2650sec, 지연시간은 125.20 $\mu\text{s}$ 로 측정되었으며, 탄속 펄스는 정상이었고, 시한 메시지 또한 정상적으로

출력되었다. 탄속측정장치의 펄스 신호 및 시한 메시지 파형은 그림 10과 같고, 사격통제장치에서 생성한 시한 메시지 신호는 그림 11과 같다.

이상과 같이 기술시험을 통해 우선 탄속측정과 시한계산 프로그램을 직접 실행하여 시한값을 출력하는 기능을 확인하였다.

## 5. 맺음말

초소형이며 신뢰성이 높고 고정밀의 탄속측정장치의 개발에 착수하여, 기술 및 적용 부품에 대한 기술 조사, 관련 이론연구 및 성능예측 시뮬레이션을 거쳐 탄속 측정장치를 설계하였고 2단계로 구분한 예비시험을 수행하였으며, 40mm 및 20mm 모의탄의 실사격에 의한 탄속측정 기술시험을 수행하여 탄속측정장치의 기능과 성능을 입증하였다.

35mm 대공포에 적용한 코일유도방식에 비교하여 정밀도가 높고 초소형/초경량으로 개인휴대 화기에 적용할 수 있게 개발하였다.

총구에서 탄속측정에 의한 탄의 비행시간 설정방식은 휴대용 화기 시스템에 적용한 사례가 없는 기술로 처음으로 시도되었다.

본 시스템의 개발로 일반적으로 발생하는 탄속편차 5%를 0.1% 수준으로 탄속 보정이 가능하게 됨에 따라 화기 시스템 적용시 타격 정밀도 향상을 기대할 수 있고 또한 탄속편차 감소를 위한 탄의 생산비용 절감 등이 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] US Army ARDEC, "Program Definition and Risk Reduction Phase of Objective Individual Combat Weapon for US Army", Department of Defense, US, 1999.
- [2] US Army ARDEC, "System Requirements of Objective Individual Combat Weapon for US Army", Department of Defense, US, 1999.
- [3] US Army ARDEC, "Operational Requirements Document of Objective Individual Combat Weapon for US Army", Department of Defense, US, 2000.
- [4] 김종천, "총구속도 측정장치 개발보고서", GSDC-519-020353, 국방과학연구소, 2002.
- [5] C. H. Smith, R. W. Schneider, "The Growing Role of Solid-State Magnetic Sensing", Proceedings Sensors Expo, Boston, pp. 139~149, 1997.
- [6] Sankar, S. G., Herbst, J. F., Koon, N. C., "High Performance Permanent Magnet Materials", Materials Research Society, 1987.
- [7] Campbell, P., "Permanent Magnet Materials and their Application", Cambridge University Press, 1994.
- [8] National Semiconductor, "National's Analog & Interface Products Data Book", 2002.