

# A Computation Method for Time of Flight in the Anti-Aircraft Gun Fire Control System

Jaehun Kim<sup>†</sup> · Euiwhan Kim<sup>\*\*</sup> · Sukjin Yu<sup>\*\*\*</sup> · Sungho Kim<sup>\*\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

In AAGFCS the effective range is regarded as a range for the bullet's speed exceeding the speed of sound to damage the stationary target. Hence the real engagement range might be extended over the effective range for the approaching target since bullet's relative speed to the target increases depending on the approaching speed. However previous TOF equations have good computation accuracy within the effective range only, and they can not be used above that range due to their bad accuracy. We propose an accurate TOF computation method which can be used both within and above the effective range in real time. Some simulation results are shown to demonstrate usefulness of our algorithm for the 30mm projectile.

**Keywords :** Point Mass Differential Equation, Closed Form Ballistic Solution, Equivalent Air Density, Time of Flight, Real Time Processing

## 대공화기 탄자비행시간 계산 기법

김재훈<sup>†</sup> · 김의환<sup>\*\*</sup> · 유석진<sup>\*\*\*</sup> · 김성호<sup>\*\*\*\*</sup>

## 요 약

대공화기사격통제장치에서 유효사거리는 정지한 표적에 대해 충분한 파괴력을 가질 수 있도록 탄속이 음속 이상을 유지하는 거리로 정의되고 있다. 접근하는 표적은 탄과 표적 간 상대속도가 증가하므로 실질적인 교전 사거리는 위의 유효사거리보다 더욱 연장된다. 그러나 기존에 제시된 TOF 계산식은 유효사거리 내에서만 정확하고 유효사거리를 벗어나면 정확하지 못하다. 본 논문은 교전사거리를 보장할 수 있도록 유효사거리 내에서의 유효사거리 밖에서도 충분한 정확도를 가진 실시간 처리가 가능한 탄자비행시간 계산 기법을 제시한다. 시뮬레이션 결과를 통해 30mm 대공 탄에 대한 본 논문의 유용성을 보인다.

**키워드 :** 점질량 탄도미분방정식, 닫힌형태 탄도해, 등가공기밀도, 탄자비행시간, 실시간 처리

## 1. 서 론

대공화기체계에서는 실시간 처리가 중요하므로 탄자비행시간 계산 방법은 탄도운동미분방정식에 대한 닫힌형태 해를 유도하여 사용하고 있다[1-7]. 대공화기 사격통제장치에서 탄자비행시간(Time of Flight; TOF)은 이동하는 표적과 탄의 충돌 지점을 예측하는 데 사용되므로, 탄자비행시간 계산의 정확성은 명중률에 있어 매우 중요하다.

대공화기체계에서 유효사거리는 정지한 표적을 기준으로

표적을 파괴하기에 충분한 탄속을 유지하는 거리로 정의하는데 통상 탄의 속도가 음속 이상이 되는 거리를 유효사거리로 사용하고 있다[1, 3]. 유효사거리 내에서는 탄속이 음속 이상이므로 공기저항계수( $C_d$ ) 모델링이 간단하고 이를 바탕으로 유도한 탄자비행시간 계산식은 간단하면서도 정확하여 세계적으로 대공화기사격통제에 널리 활용되고 있다[1-5].

그러나 기존에 사용하고 있는 탄자비행시간 식은 유효사거리를 벗어나게 되면  $C_d$  모델링의 정확성이 떨어져서 계산 오차가 급격히 커진다. 접근하는 표적은 표적과 탄의 상대속도가 증가하므로 교전사거리는 실질적으로 유효사거리 이상으로 증가하게 되는데, 종전의 탄자비행시간 계산 방법은 이 경우 쓸 수가 없어서 체계의 운용거리가 크게 줄어든다.

본 논문은 이러한 문제점을 개선하기 위해 탄속이 음속 이상은 물론 음속 이하인 영역의 거리에서도 정확도가 높은 탄자비행시간 계산 방식을 제시한다.

<sup>†</sup> 정 회 원 : 사격통제연구소 대표  
<sup>\*\*</sup> 정 회 원 : 아주대학교 시스템공학과 교수  
<sup>\*\*\*</sup> 정 회 원 : 현대로템 수석연구원  
<sup>\*\*\*\*</sup> 정 회 원 : 현대로템 선임연구원  
Manuscript Received: July 15, 2015  
First Revision: August 27, 2015  
Second Revision: September 24, 2015  
Accepted: September 30, 2015  
\* Corresponding Author : Sungho Kim(sunghokim@hyundai-rotem.co.kr)

본 논문은 서문에 이어 2절에서는 직사화기 운용조건을 고려하여 비선형 탄도미분방정식에 대한 선형화를 통해 닫힌형태의 탄도해를 유도하는 방법을 제시한다. 특히 모든 탄종의 직사화기 적용할 수 있는 일반적인 탄자비행시간 식을 유도한다. 또한, 3절에서는 2절에서 제시된 탄자비행시간 식을 30mm 대공화기에 적용한 결과를 보인다. 특히 기존 문헌에서 제시한 탄자비행시간 계산식이 탄의 유효사거리를 벗어나면 오차가 증가하여 실제계에서 사용하기 어려운 것과 달리 본 논문에서 제시한 방법은 실제계에 적용할 수 있도록 충분한 정확성을 보유하고 있음을 시뮬레이션을 통해 보인다.

## 2. 닫힌형태 탄도해 유도

### 2.1 탄도운동 방정식 가정

본 논문에서 실시간처리를 위한 탄도해 유도에 사용한 탄도미분방정식은 직사화기를 대상으로 하여 탄을 점질량으로 가정하였고, 공기 저항은 drag만을 고려하였다. 또한 비교적 비행시간이 짧으므로 지구자전에 의한 Coriolis 힘은 제외하였다. 또한 대기조건은 국제 민간 항공 기구(International Commercial Aviation Organization)의 표준 규정을 사용하였다[1-7].

### 2.2 탄도의 정의

탄의 운동은 Fig. 1과 같이 포가 위치한 지점에서 중력 반대방향을 y축, 수평면 상에서 탄이 발사한 방향을 x축으로 정의한다.

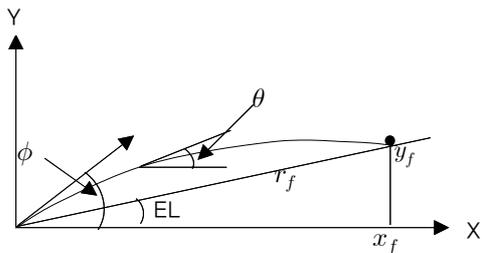


Fig. 1. Definition of Ballistic Trajectory

탄 발사 각도는  $\phi$ , 탄도에 수직선과 수평면 사이 각도는 탄의 경사각으로  $\theta$ , 표적의 고각은 EL, 그리고 표적 거리는  $r_f$ 라 정의한다.

$$\text{시간 } t \text{에서 탄의 위치는 } \vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j},$$

$$\text{속도는 } \vec{v}(t) = \dot{x}(t)\vec{i} + \dot{y}(t)\vec{j},$$

$$\text{가속도는 } \vec{v}(t) = \ddot{x}(t)\vec{i} + \ddot{y}(t)\vec{j} \text{라 하면,}$$

탄도운동방정식은 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$\ddot{x}(t) = H(t)\dot{x}(t) \tag{1}$$

$$\ddot{y}(t) = H(t)\dot{y}(t) - g \tag{2}$$

여기서  $g$ 는 중력가속도이며,

$$H(t) = -\left(\frac{iS}{2w}\right)(\rho_g e^{-f_a y}) C_d v(t) \tag{3}$$

여기서  $w$ 는 탄의 질량,  $S$ 는 탄의 단면적,  $i$ 는 탄의 형상을 나타내는 form factor이다. 또한  $\rho_g$ 는 포 위치에서 공기 밀도,  $f_a$ 는 고도에 따른 공기밀도 감쇄 계수,  $y(t)$ 는 탄의 고도이고,  $C_d$ 는 공기저항계수,  $v(t)$ 는 표적의 속도이다.

### 2.3 탄도해 유도를 위한 운동방정식 근사화

Equation (1), (2), (3)으로 정의된 미분방정식은 비선형 미분방정식이므로, 일반적으로는 수치적분으로 계산해야 한다 [8-10]. 본 논문에서는 직사화기 운용조건을 고려하여 탄도미분방정식을 근사화하여 탄자비행시간 식을 유도한다. Equation (1), (2)를 이용하면,

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{\dot{x}}{v} \ddot{x} + \frac{\dot{y}}{v} \ddot{y} \\ &= H(t)v(t) - g \sin(\theta(t)) \end{aligned} \tag{4}$$

Equation (4)에서 둘째 항은 첫째 항과 비교하여 크기가 매우 작으므로 상대적으로 무시하면,

$$\dot{v}(t) = H(t)v(t) \tag{5}$$

또한  $C_d$ 는 탄속의 mach값의 지수로 속도 구간별로 다음과 같이 모델링한다.

$$C_d = A_i \left(\frac{v}{v_s}\right)^{a_i} \tag{6}$$

여기서,  $v_s$ 는 음속이며,  $A_i, a_i$ 는 탄속 구간마다 정해지는 상수이다. Equation (6)을 Equation (3)에 대입하여  $H(t)$  식을 구하면,

$$\begin{aligned} H(t) &= -\left(\frac{iS}{2w}\right)(\rho_g e^{-f_a y}) A_i \left(\frac{v(t)}{v_s}\right)^{a_i} v(t) \\ &= -C_{1i} v(t)^{a_i+1} \end{aligned} \tag{7}$$

Equation (7)에서

$$C_{1i} = \left(\frac{iS}{2w}\right) \left(\frac{\rho_g A_i}{v_s^{a_i}}\right) e^{-f_a y} \tag{8}$$

공기밀도의 영향을 대표할 수 있는 등가고도를 별도로 알 수가 있다고 가정하면, Equation (8)은 상수가 된다. 본 논문에서는 등가고도를 다음 식으로 모델링한다.

$$\bar{y} = k_y(r_f, EL) y_f \tag{9}$$

$k_y$  값은 표적의 고각과 사거리에 따라 결정되는 상수이며, 이것을 이용하면 Equation (8)은 다음과 같은 상수가 된다.

$$C_{1i} = \left(\frac{iS}{2w}\right) \left(\frac{\rho_g A_i}{v_s^{a_i}}\right) e^{-f_a \bar{y}} \quad (10)$$

Equation (10)에서 등가고도 밀도 식을 적용하고, Equation (5)에 의해 탄 속에 미치는 중력의 영향을 무시하면, 앞의 Equation (5)는 변수분리 방법으로 닫힌형태의 해를 구할 수가 있게 된다.

2.4 닫힌형태 탄자비행시간 유도

앞 절에서 정의한 가정을 적용하여 탄도미분방정식을 근사화하면, 다음과 같이 기술할 수가 있다[5, 7].

$$\dot{u}(t) = -C_{1i} u(t)^{a_i+2} \quad (11)$$

위의 탄도미분방정식은 원래의 탄도미분방정식과 구분하기 위해 변수  $v(t)$  대신  $u(t)$ 를 사용하였다. Equation (11)을 변수분리 방법으로 적분하면 다음과 같이  $u(t)$ 와  $t$ 를 유도할 수 있다.

$$\dot{u} = -C_{1i} u^{a_i+2} \quad (12)$$

$$dt = -\frac{1}{C_{1i}} u^{-a_i-2} du \quad (13)$$

$$t = -\int_{u(0)}^u \frac{1}{C_{1i}} u^{-a_i-2} du$$

여기서,  $B_i = u(0)$  로 놓으면

$a_i \neq -1$  일때

$$t = \frac{1}{(a_i+1)C_{1i}} (u^{-(a_i+1)} - B_i^{-(a_i+1)}) \quad (14)$$

이것을  $u$ 에 대한 식으로 전개하면

$a_i \neq -1$  일때

$$u = B_i [1 + (a_i+1)B_i^{a_i+1} C_{1i} t]^{-\frac{1}{a_i+1}} \quad (15)$$

$$a_i = -1 \text{ 일때 식은 } t = -\frac{1}{C_{1i}} \left[ \ln \frac{u}{B_i} \right] \quad (16)$$

$u(t)$ 로 바꾸면,

$$u(t) = B_i e^{-C_{1i} t} \quad (17)$$

$r(t)$ 를 구하기 위해 Equation (15), (16) 식을 적분하면,  $a_i \neq 0, a \neq -1$  일 때,

$$r(t) = \frac{B_i^{-a_i}}{a_i C_{1i}} [(1 + (a_i+1)B_i^{a_i+1} C_{1i} t)^{\frac{a_i}{1+a_i}} - 1] \quad (18)$$

$a_i = 0$  일 때,

$$r(t) = \frac{1}{C_{1i}} \ln(1 + C_{1i} B_i t) \quad (19)$$

$$a_i = -1 \text{ 일 때, } r(t) = \frac{B_i}{C_{1i}} (1 - e^{-C_{1i} t}) \quad (20)$$

Equation (18)~(20)으로부터 표적거리  $r_f$ 가 주어질 때 탄자비행시간  $t_f$ 는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$a_i \neq 0, a_i \neq -1$  일때,

$$t_f = \frac{1}{(a_i+1)B_i^{a_i+1} C_{1i}} [(1 + a_i C_{1i} B_i^{a_i} r_f)^{\frac{1+a_i}{a_i}} - 1] \quad (21)$$

$a_i = 0$  일 때,

$$t_f = \frac{1}{C_{1i} B_i} (e^{C_{1i} r_f} - 1) \quad (22)$$

$a_i = -1$  일 때,

$$t_f = \frac{1}{C_{1i}} \ln \frac{B_i}{B_i - C_{1i} r_f} \quad (23)$$

3. 대공화기 적용 사례

여기서는 2절에서 제시한 탄자비행시간 계산식을 30mm 탄에 적용하는 방법을 보인다. 3.1절에서 탄의 공기저항계수 ( $C_d$ )에 대한 모델링 방법을 보이고, 3.2절에서는 표적이 탄의 유효사거리 내에 위치한 경우에 대한 탄자비행시간 식을 제시하며, 3.3절에서는 기존 문헌에 제시한 탄자비행시간 계산식과 비교 검토하고, 마지막으로 3.4절에서는 표적이 유효사거리 밖에 위치한 경우에 대한 탄자비행시간 계산 방법을 제시한다. 아울러 3.3절과 3.4절에 시뮬레이션을 통해 기존 제시 방법과 본 논문과의 비교를 통해 본 논문의 효과를 보인다.

3.1 공기저항계수( $C_d$ ) 모델링

30mm 탄의  $C_d$  데이터는 Fig. 2와 같이 주어진다. Fig. 2에서 보듯이  $C_d$ 는 3개 구간으로 구분할 수가 있다.

- 구간 1:  $mach > 1.03$
- 구간 2:  $0.86 < mach \leq 1.03$
- 구간 3:  $mach \leq 0.86$

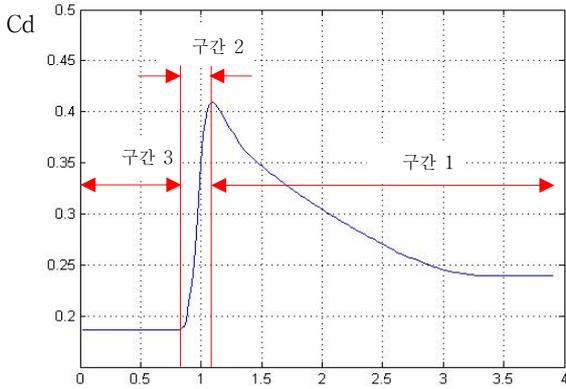


Fig. 2. Cd vs. Mach Graph

$C_d$ 는 구간별로 다음과 같이 지수식으로 모델링을 할 수 있다.

$$C_d = A_i \left(\frac{v}{v_s}\right)^{a_i} \quad (24)$$

Fig. 2에 대해 Equation (24)를 적용하여 모델링한 결과, 각 구간별로 모델링 계수는 커브 피팅 방법으로 다음 Table 1과 같이 구할 수가 있다.

Table 1. 30mm 탄  $C_d$  모델링 계수

	$A_i$	$a_i$
구간 1	0.4267	-0.5
구간 2	0.325	3.7
구간 3	0.186	0

3.2 유효사거리 내 탄자비행시간 계산 식

공기저항이 작은 고속 탄의 경우 탄의 속도가 음속 이상이 되는 거리를 유효사거리라 하며, 이 구간에서는 Table 1에서 보듯이  $a_1 = -0.5$ 로 할 수 있다는 것이 잘 알려져 있다[1, 3]. 따라서, 2절에서 유도한 탄도식에  $A_1 = 0.4260$ ,  $a_1 = -0.5$ 를 대입하면 다음과 같은 탄도식을 얻을 수가 있다.

$$r(t) = \frac{B_1 t}{1 + \beta_1 t} \quad (25)$$

$$t = \frac{r(t)}{B_1 - \beta_1 r(t)} \quad (26)$$

여기서,

$$\beta_1 = \frac{C_{11} \sqrt{B_1}}{2} \quad (27)$$

$$\bar{y} = k_y y_f, B \quad (28)$$

$$C_{11} = \left(\frac{iS}{2w}\right) \rho_g A_1 v_s^{0.5} e^{-f\bar{y}} \quad (29)$$

Equation (26)을 이용하면, 표적의 거리 R과 고각 EL이 주어지면 표적까지 탄자비행시간  $t_{f1}$  계산은 시행착오적으로 표적에 도달하기 위한 탄도를 반복하여 구하지 않고도 다음 식으로 바로 구할 수가 있다.

$$t_{f1} = \frac{R}{B_1 - \beta_1 R} \quad (30)$$

Equation (30)을 적용하여 표적의 사거리 및 고각별로 탄자비행시간 계산 오차를 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기서 Equation (28)의 등가고도 상수  $k_y$ 는 사거리 및 고각에 따라  $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{5}$ 로 사표로부터 튜닝을 하여 사용하였다.

Fig. 3에서 보듯이 탄자비행시간은 최대 거리에서 4.9초이고, 계산 오차는 최대 0.5msec이며, 오차비율은 0.01%로 매우 정확하다.

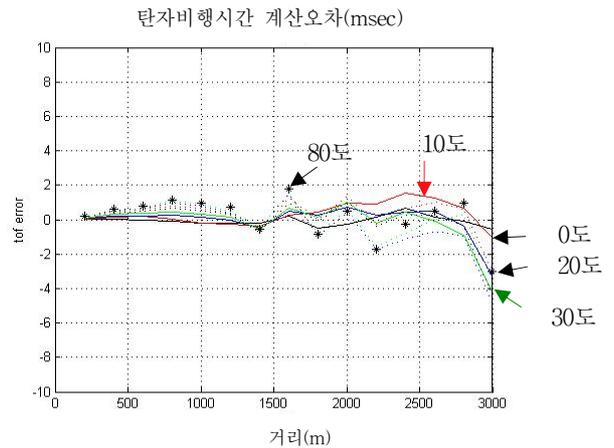


Fig. 3. TOF Computation Error (within 3000 m)

3.3 기존의 대공 탄자비행시간 계산식

참고문헌[1, 3]에서는 대공화기 탄자비행시간으로 각각 다음과 같은 계산식을 제시하고 있다.

$$t_{f,[1]} = \frac{R}{B_1 - \beta_0 \left(1 - \frac{1}{3} f_a R \sin EL\right) R} \quad (31)$$

$$t_{f,[3]} = \frac{R}{B_1 - \beta_0 \left(1 - \frac{1}{6} f_a R \sin EL\right) R} \quad (32)$$

여기서  $\beta_0 = \frac{C_{11}(\bar{y}=0) \sqrt{B_1}}{2}$

Equation (31)과 (32) 및 3.2절에서 제시한 계산식은 본 논문의 유효사거리 내에서 제시한 Equation (30)과 형태가 동일하다. 단지 이들 식은 표적의 운용 고각에 따른 공기밀도 영향을 보상하기 위한 계수에 차이가 있다. Equation (30)은 표적의 고각을 반영하여 등가고도계수를 튜닝하였으므로, 표적의 고각이 변화할 때 Equation (31)이나 (32)보다 계산 오차가 적다.

한편, 지상표적인 경우(EL=0) Equation (30)~(32)는 모두 동일하며, 이 식을 이용하여 유효사거리 밖의 탄자비행시간 계산 오차를 나타내면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 보듯이 대공화기에 대해 제시된 기존의 탄자비행시간 계산식의 오차는 3000~4000m 영역에서는 최대 0.5sec, 4000~5000m 영역에서는 최대 4sec로 기하급수적으로 증가한다. 이 정도 오차 수준이면 표적이 유효사거리를 벗어날 경우 탄자비행시간 계산식은 실제계에 적용하기가 곤란하다.

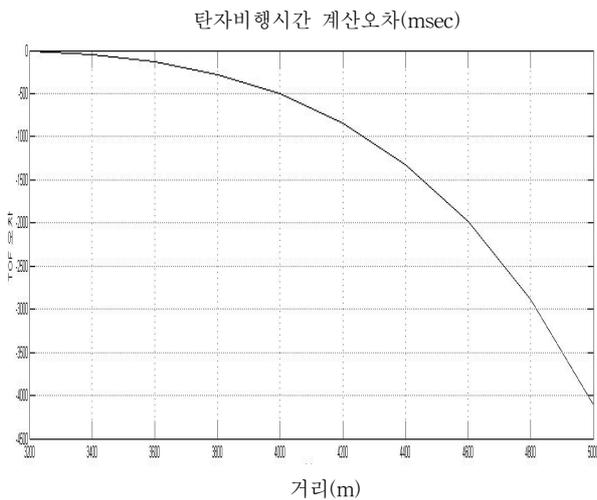


Fig. 4. TOF Computation Error (3000~5000m)

그런데 접근하는 대공 표적일 경우 탄과 표적 간 상대속도가 증가하므로, 정지된 표적을 기준으로 정의된 유효사거리 밖이라 하더라도 탄은 표적을 충분히 파괴할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이 경우에 대비한다면 대공화기 체계는 교전사거리를 증가하는 운용 효과를 얻을 수가 있다.

기존 문헌에서는 유효사거리 밖의 표적에 대한 탄자비행시간 식을 제시하지 않았으므로, 본 논문에서는 유효사거리 밖의 표적에 대해서도 탄자비행시간을 정확히 계산할 수 있는 방법을 다음 절에서 제시하고자 한다.

### 3.4 유효사거리 밖에서 탄자비행시간 계산

3.1절에서 각 구간별로  $C_i$ 를 지수로 모델링한 계수가 Table 1로 주어졌으므로, 이들 모델링한 계수에 대해 2절에서 구한 탄도해를 적용하면 각 구간에 대한 탄자비행시간을 구할 수가 있다.

구간 1은 탄속이 mach 1.03 이상이 되는 구간으로 유효사거리 내에 해당하고, 구간 2는 탄속이 mach 1.03부터 mach 0.86 범위에 해당하며, 구간 3은 탄속이 mach 0.86 이내인 구간이다. 구간 2 및 구간 3은 유효사거리 밖의 거리에 해당한다. 여기서는 유효사거리 밖에 위치한 구간 2 및 구간 3 표적에 대해 탄자비행시간 계산 방법을 각각 제시한다.

#### 1) 구간 2 표적에 대한 탄자비행시간 계산

2절에서 유도한 탄도식을 이용하여 구간 2 표적에 대한 탄자비행시간 계산 절차를 기술하면 다음과 같다.

- a) 구간 1을 통과하는 데 걸리는 비행시간( $t_{1f}$ )을 계산한다. 이것은 Equation (14)에  $u = 1.03v_s$ ,  $B_1$  값을 대입하여 다음 식으로 구한다.

$$t_{1f} = \frac{1}{0.5C_{11}} [u^{-0.5} - B_1^{-0.5}] \quad (33)$$

- b) 구간 1이 끝나는 거리( $R_1$ )를 위에서 구한  $t_{1f}$ 를 Equation (25)에 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$R_1 = \frac{B_1 t_{1f}}{1 + \beta_1 t_{1f}} \quad (34)$$

- c) 구간 2를 비행하는 거리( $\Delta R_2$ )를 구한다.

$$\Delta R_2 = R - R_1 \quad (35)$$

- d) 구간 2를 비행하는 시간( $t_{f2}$ )를 Equation (21)을 이용하여 다음과 같이 구한다. 여기서  $B_2 = 1.03v_s$ .

$$t_{f2} = \frac{1}{(a_2 + 1)B_2^{a_2 + 1} C_{12}} \left[ \left( \frac{1 + a_2}{a_2} C_{12} B_2^{a_2} \Delta R_2 \right)^{\frac{1 + a_2}{a_2}} - 1 \right] \quad (36)$$

- e) 전체 비행시간을 다음과 같이 계산한다.

$$t_f = t_{1f} + t_{f2} \quad (37)$$

#### 2) 구간 3 표적에 대한 탄자비행시간 계산

구간 3에 위치한 표적의 경우는 구간 1, 구간 2 및 구간 3을 비행하게 되므로 각각의 구간 비행시간을 계산하여 더하면 구할 수가 있다. 이 절차를 정리하면 다음과 같다.

- a) 구간 2 전체 비행시간( $t_{2f}$ )을 Equation (14)에  $B_2 = 1.03v_s$ ,  $u = 0.86v_s$ 를 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$t_{2f} = \frac{1}{(a_2 + 1)C_{12}} (u^{-(a_2+1)} - B_2^{-(a_2+1)}) \quad (38)$$

b) 구간 2 전체를 비행하는 거리( $\Delta R_{2f}$ )는 위식에서 구한  $t_{2f}$ 를 Equation (18)에 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$\Delta R_{2f} = \frac{B_2^{-a_2}}{a_2 C_{12}} [(1 + (a_2 + 1)B_2^{a_2+1} C_{12} t_{2f})^{\frac{a_2}{1+a_2}} - 1] \quad (39)$$

c) 구간 2가 끝나는 거리( $R_2$ )를 구한다.

$$R_2 = R_1 + \Delta R_{2f} \quad (40)$$

d) 구간 3의 비행거리( $\Delta R_3$ )를 구한다.

$$\Delta R_3 = R - R_2 \quad (41)$$

e) 구간 3에서 비행하는 시간( $t_{f3}$ )을 구한다.

$a_3 = 0$ 이므로 Equation (22)에 의해 다음과 같이 비행시간을 구한다. (단,  $B_3 = 0.86v_s$ )

$$t_{f3} = \frac{1}{C_{13}B_3} (e^{c_{13} \Delta R_3} - 1) \quad (42)$$

f) 전체 탄자비행시간을 구한다.

$$t_f = t_{1f} + t_{2f} + t_{f3} \quad (43)$$

지금까지 언급한 내용을 바탕으로 탄자비행시간 계산 프로그램을 보면 Fig. 5와 같다.

3) 유효사거리 밖 표적에 대한 탄자비행시간 시뮬레이션 결과

30미터 탄에 대해 1) 및 2)에 제시한 유효사거리 밖의 표적에 대한 탄자비행시간 식과 수치적분 방법으로 계산한 결과를 비교하면 Fig. 6과 같다.

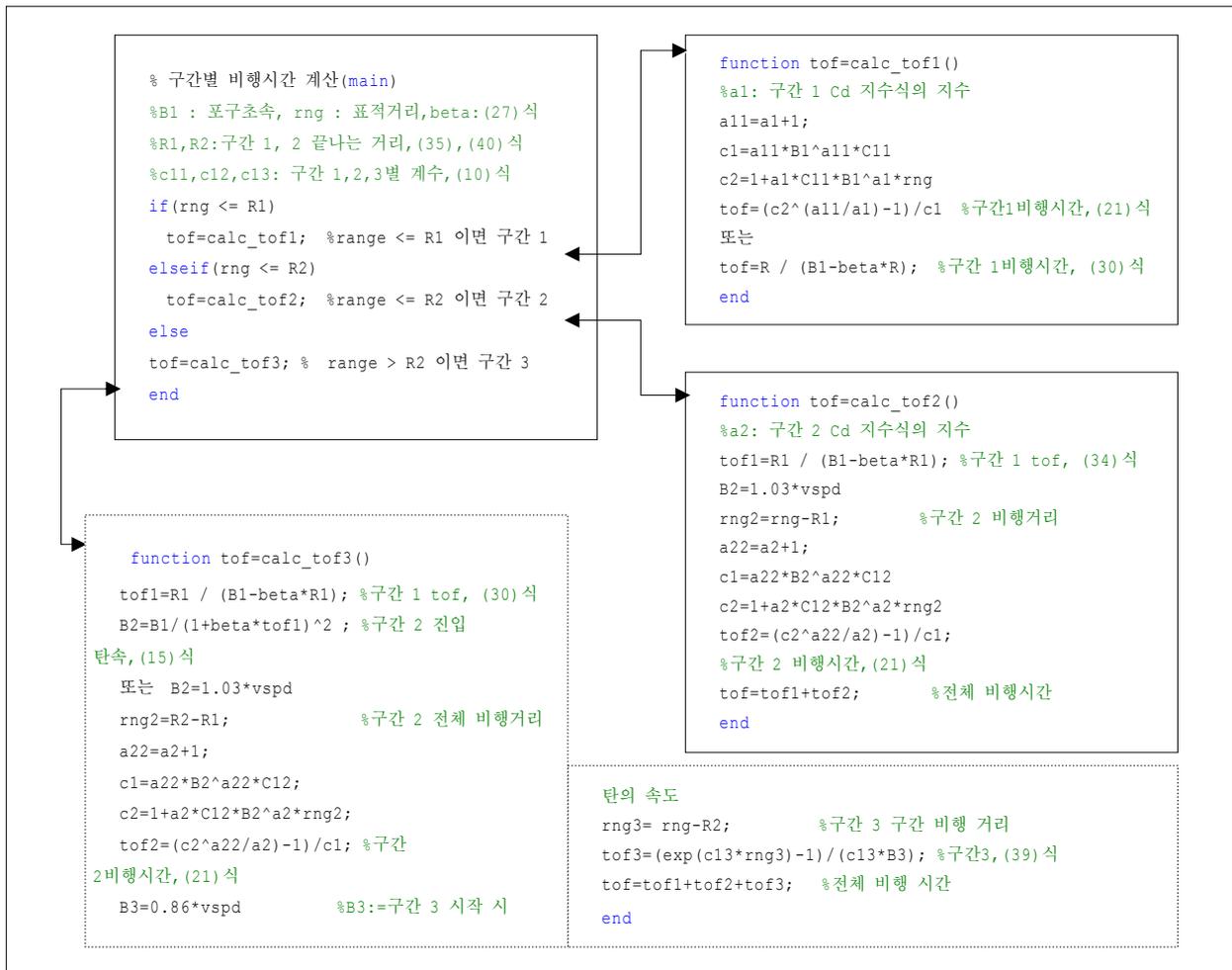


Fig. 5. TOF Computation Program

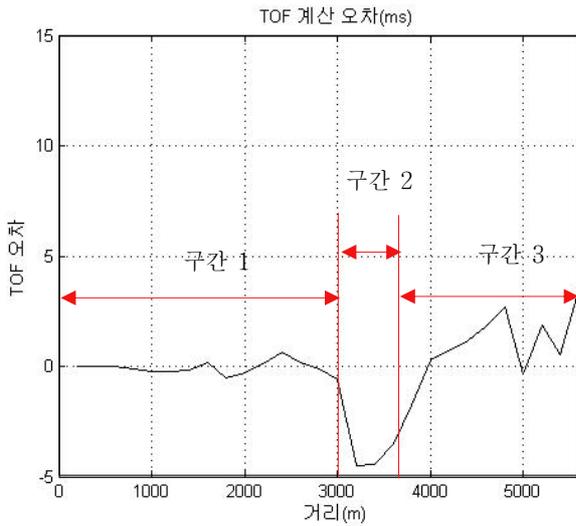


Fig. 6. TOF Computation Error

Fig. 6에서 보듯이 본 논문에서 제시한 탄자비행시간 계산 방법은 유효사거리 이상 거리인 3000m 이상 5000m 거리 표적에 대해 최대 오차가 5ms 이내로 운용상 충분한 정확성을 지님을 알 수 있다.

이것은 기존의 탄자비행시간 계산 방법이 Fig. 4에서 최대 4sec로 매우 부정확한 것과 비교할 때 뚜렷한 차별성을 가지며, 본 논문 방법의 효과를 확인할 수가 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 대공화기사격통제장치를 위한 새로운 탄자비행시간 계산 방법을 제시하였다. 기존의 탄자비행시간 식은 탄의 유효사거리 내에서는 정확하나, 접근하는 표적과 같이 실질적으로 교전사거리가 증가하는 경우에는 오차가 너무 커서 쓸 수가 없다. 본 논문은 이 문제를 해결하기 위하여 공기저항계수( $C_d$ ) 모델을 유효사거리 밖의 구간까지 확대한 탄자비행시간 식을 유도하고 이를 응용하여 유효사거리 밖에서도 정확하게 계산할 수가 있도록 하였다.

최종적으로 30mm 대공 탄에 대한 시뮬레이션을 통해 본 논문의 효과를 확인하였다.

#### References

[1] F. V. Johnson, et. al., "Formulation of An Advanced Anti-Aircraft Gun Director," GEC, 1973.  
 [2] Sungho Kim, "Derivation of Effective ballistic function using linear multiple regression," ADD, 1981.

[3] Jaehun Kim, "Real time processing ballistic algorithm for small Battleship Fire control system (CESD-519-92155)," ADD, Mar., 1992.  
 [4] M. S. Ganagi, et. al., "Approximate Closed-Form Solution for Projectile Trajectory and its Application to Lead Angle Computations," *Defense Science Journal*, Vol.49, No.3, July pp.179-186. Jul., 1999.  
 [5] Paul Weinacht, et. al., "Analytical Prediction of Trajectories for High-Velocity Direct-Fire Munitions," ARL, 2005.  
 [6] Kang Park, et. al., "A study on the Bullet Trajectory for the Anti-aircraft Gun," in *Proceedings of 2012 KCC*, Vol.39, 2012.  
 [7] George Klimi, "Exterior Ballistics," X librarsy LLC, 2014.  
 [8] Herrmann, "Exterior Ballistics," U. S. Naval Institute, 1935.  
 [9] Robert F. Lieske, et. al., "Equations of Motion For A Modified Point Mass Trajectory," BRL, No.1314, 1966.  
 [10] Arthur A. Duke, et. al., "A Ballistic Trajectory Algorithm for Digital Airborne Fire Control," Naval Weapons Center, 1973.



#### 김 재 훈

e-mail : kjh1132a@nate.com

1981년~1984년 서울대학교 전기공학과 (학사/석사)

2003년 충남대학교 전자공학과(박사)

1984년~2006년 국방과학연구소 책임연구원

2006년~2010년 국방기술품질원 책임연구원

2010년~현 재 사격통제연구소 대표

관심분야: 사격통제 장치설계 기법, 체계시험평가 기법



#### 김 의 환

e-mail : keuiwhan@ajou.ac.kr

1979년 서울대학교 공업교육과(학사/석사)

1989년 미국 MIT 재료공학과(석사/박사)

1979년~2012년 국방과학연구소

2012년~현 재 아주대학교 시스템공학과 교수

관심분야: 시스템 분석/시험평가, 시스템엔지니어링 프로세스



**유 석 진**

e-mail : ysjok@hyundai-rotem.co.kr  
1989년 중앙대학교 물리학과(학사)  
1991년 중앙대학교 물리학과(석사)  
1991년~1996년 PCC 주임연구원  
1996년~2000년 현대우주항공 선임연구원  
2000년~현 재 현대로템 수석연구원

관심분야: 사격통제시스템, 전기구동/동력시스템, 소프트웨어  
신뢰성



**김 성 호**

e-mail : sunghokim@hyundai-rotem.co.kr  
2001년 울산대학교 제어계측공학과  
(학사/석사)  
2013년~현 재 아주대학교 시스템공학과  
박사과정  
2003년~현 재 현대로템 선임연구원

관심분야: 사격통제시스템, 항법시스템, 제어용 네트워크