

# 가속력과 원심력을 받는 지그잭 스위치의 민감도 해석 Sensitivity Analysis of the Zigzag Switch under Acceleration and Centrifugal Forces

김 경 환 (국방과학연구소)  
Kyoung-Hwan Kim (ADD)

**Key Words** : Switch(스위치), Zigzag Cam(지그잭 캠), Velocity Change(속도변화), Acceleration sensor(가속도센서)

## Abstract

Sensitivity analysis of the cylindrical zigzag cams under acceleration and centrifugal forces is performed. A Lagrangian method is used to determine the mechanism constant of zigzag track. And the equation of motion for cylindrical zigzag cam under rectangular pulse is derived by the governing equations of a single spring mass system. The ratio of the drive force to resisting force is derived by angular acceleration, centrifugal force and setback force on the operation of the munition. The theoretical sensitivity curves for 3 models are analyzed. And experiments for 3 models are conducted to check safe and functional zone. Zigzag cam types can be satisfied all major design requirements for switch system of munition.

### 1. 서론

신관용 스위치는 탄이 발사된 후에 전원 및 기폭관의 회로를 연결시켜 주는 일종의 안전장치로서 안전장전(Safety & Arming)장치의 구속기구와 마찬가지로 두 개의 독립된 힘에 의해서 만이 작동되는 기본적인 안전조건<sup>(1)</sup>을 만족하여야 한다.

대부분의 신관용 스위치는 안전조건을 만족하기 위하여 설계된 복잡한 구조로 인하여, 설치공간 확보는 물론이고 작동신뢰성의 저하를 가져오고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 실험실에서 다방면으로 연구가 진행중에 있으며, 실용화된 스위치로서 가장 단순한 시스템은 핀-볼-핀(pin-ball-pin) 시스템이다. 핀-볼-핀 시스템은 유럽의 신관에서 주로 사용되는 것으로 스위치 뿐만 아니라 안전장전장치의 관성핀으로도 사용되고 있다. 그러나 이들은 제한된 탄에만 사용 가능하도록 설계되어 있는 일종의 전용장치이다.

따라서 본 연구에서는 화포용 모든 탄에 적용 가능한 모듈형 지그잭 스위치 개발을 위한 연구로서 탄의 가속도에 의해 운동하는 관성 지그잭 캠의 운동 민감도와 이에 미치는 회전의 영향을 해석하고자 한다.

먼저 모듈형 스위치의 설계는 "1. 12m 높이에서 자유낙하시 어떠한 표면에서의 충격에도 작동되지

않아야 한다. 2. 최소 500g's 이하의 가속도에서 작동되어야 한다. 3. 회전력에 관계없이 작동되어야 한다. 4. 좁은 공간내의 설치를 위하여 단순하고 소형이어야 한다". 라는 4가지 조건을 염두에 두어야 한다. 여기서 1항은 기본 안전조건이며, 2 및 3항은 작동조건을 그리고 4항은 신관의 특성상 설치면적의 확보가 쉽지 않다는 것이다. 이들의 조건을 만족하기 위하여서는 관성물체의 운동에 필요한 속도변화량의 해석과 가속력과 회전에 의한 측면 마찰력의 비교가 필요하다.

가속도를 받는 관성핀과 지그잭 핀의 운동방정식은 1973년 Overman<sup>(2)</sup>에 의해 처음으로 제시되었고, 70년 후반에는 George<sup>(3)</sup> 등에 의해 박격포탄용 신관의 관성핀으로 처음으로 실용화 되었다. 이후에도 지그잭 가속도센서의 연구는 실험실에서 광범위하게 연구되어 오고 있으나 실용화되지는 못하였다. 그리고 1988년 Overman<sup>(4)</sup>은 나선형 운동을 하는 플라이휠 장치의 지배방정식을 유도하였고, 국내에서도 1995년 김경환<sup>(5)</sup>등에 의하여 가속도를 받는 원통형 지그잭 캠의 지배방정식을 Lagrangian법으로 유도하여 가속도하에서의 지그잭 캠이 운동하는데 필요한 속도변화를 해석한 바 있다.

본 연구에서는 가속도를 받는 지그잭 캠의 운동방정식을 이용하여 안전민감도와 최소 가속도에서의 작동성을 해석하고, 실험결과와 비교를 통해 방정식

의 유용성을 확인 하였다. 또한 가속력과 회전에 의한 지그잭 캠의 측면 마찰력과 관계 방정식을 유도하여 작동 가능성을 조사하였다.

## 2. 수식화

### 2.1. 안전 민감도 해석

해석모델은 캠 슬리브 속의 원통형 지그잭 캠이 가속도에 의해 트랙을 따라 좌우로 회전하면서 아래로 이동하여 접촉단자에 도달하면 회로가 구성되는 시스템으로 지그잭 캠의 자유 물체도는 Fig.1과 같다.

안전민감도의 해석은 우발적인 충격에 의한 작동 여부를 확인하는 것으로 포신을 통하지 않고 가장 쉽게 작동할 수 있는 상태, 즉 회전이 없고, 단지 가속도만이 존재하는 상태를 해석한다.

Fig.1에서 지그잭 캠의 운동에너지(T)와 포텐셜에너지(V)는 다음과 같이 표현된다

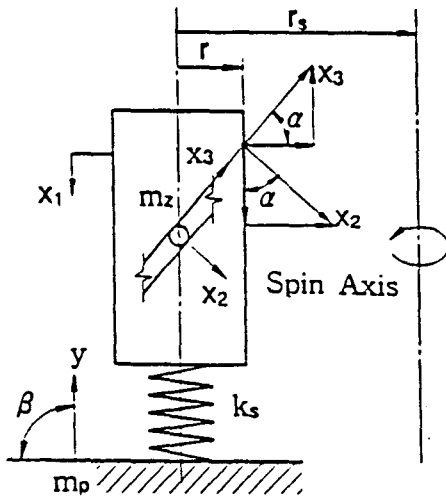


Fig. 1 Zigzag cam free-body diagram

$$T = \frac{1}{2} m_p \dot{y}^2 + \frac{1}{2} m_z (\dot{y} - \dot{x}_2 \cos \alpha + \dot{x}_3 \sin \alpha)^2 + \frac{1}{2} I \left( \frac{\dot{x}_3 \cos \alpha}{r} + \frac{\dot{x}_2 \sin \alpha}{r} \right)^2 \quad (1)$$

$$V = m_p g (y \sin \beta) + m_z g \sin \beta (y - x_2 \cos \alpha + x_3 \sin \alpha) + \frac{1}{2} k_s (x_2 \cos \alpha - x_3 \sin \alpha + x_o)^2 \quad (2)$$

여기서  $m_z$ 는 지그잭 캠의 질량,  $m_p$ 는 탄의 질량,  $I$ 는 캠의 질량 관성모멘트,  $r$ 은 캠의 작동반경,  $x_1$ 은 가속도 방향으로의 지그잭 캠의 운동변위,  $x_2, x_3$ 는 핀과의 접촉부의 운동변위,  $y$ 는 탄의 운동변위,  $k_s$ 는 바이어스 스프링상수,  $x_o$ 는 바이어스 스프링의 초기상태 변위,  $\alpha$ 는 지그잭 트랙의 각도,  $\beta$ 는 탄의 발사각이다.

식(1),(2)를 Lagrangian법으로 풀면 캠 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.<sup>(5)</sup>

$$m_z C \ddot{x} + k_s (x + x_o) = m_z (\ddot{y} + g \sin \beta) \quad (3)$$

여기서  $C$ 는 지그잭 트랙의 각도, 마찰, 그리고 지그잭 캠의 회전반경 등의 영향을 나타내는 기구학적 상수이다.

$$C = 1 + \left( \frac{k}{r} \right)^2 \left( \frac{1 + \mu \tan \alpha}{\tan \alpha (\tan \alpha - \mu)} \right) \quad (4)$$

여기서 캠이 슬리브내에서 지그잭 트랙을 따라 운동하는데 소요되는 시간을 구하기 위하여서는 캠의 운동상태를 정의할 필요가 있다. 마지막 트랙을 제외한 모든 트랙은 운동 출발점에서 속도와 시간은 0으로 보았다. 따라서 캠의 총 운동 소요시간은 각 트랙의 운동 소요시간의 합으로 볼 수 있다. 즉 마지막 트랙을 제외한 모든 트랙은 캠의 운동시간이나 가속도의 작동시간  $t_n$ 가 동일한 것으로 보았다. 그러나 마지막 트랙은 가속도가 종료된 후에도 캠은 관성력에 의하여 계속 운동하고 있으므로 가속도의 종료 시간  $t_o$ 를 알아야 한다.

여기서 캠의 운동방정식인 식(3)의 용이한 해석을 위하여 탄의 가속도를 사각형 펄스로 가정하여 해석하면,  $n$ 번째 트랙에서 운동하는데 소요되는 시간  $t_n$ 와 마지막 트랙에서의 캠이 운동하는데 필요한 가속도 지속시간  $t_f$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$t_n = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left( \frac{X_{n+1} - \frac{AW_c}{k_s} + x_o}{X_n - \frac{AW_c}{k_s} + x_o} \right) \quad (5)$$

$$t_f = \frac{1}{\omega} \left[ \cos^{-1} \frac{P^2 - Q^2 - R^2}{2QR} - \cos^{-1} \frac{P^2 - Q^2 + R^2}{2PR} \right] \quad (6)$$

$$P = AW_c, \quad Q = AW_c - k_s (X_p + x_o),$$

$$R = k_s(X_L + x_o), \quad \omega = \sqrt{\frac{k_s g}{W_c C}} \text{ 이다.}$$

여기서  $X_n$ 는 핀에서  $n$ 번째 트랙전까지의  $x$ 변위,  $A$ 는 가속도를 중력가속도로 나눈 무차원수,  $X_p$ 는 핀에서 마지막 트랙전까지의 거리,  $X_L$ 는 핀에서 캠의 작동완료 지점까지의 거리,  $W_c$ 는 캠의 중량,  $\omega$ 는 각속도이다.

따라서 캠이 완전 작동하는데 필요한 탄의 최소 속도변화량( $V_{\min}$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{\min} = Ag(\sum t_n + t_f) \quad (7)$$

식(7)은 신관의 가속도 센서로서의 절대조건인 1항과 2항을 해석하는데 필요한 식이 된다.

## 2.2 작동 민감도 해석

일반적으로 안전도 증대는 작동신뢰도의 저하를 가져온다. 최소의 가속도에 의한 작동성은 안전 민감도 해석에서 알 수 있으나, 회전용 탄의 작동 민감도는 회전의 영향을 고려하여야 한다.

회전이 있는 탄의 작동성의 검증은 탄의 가속도에 의한 관성력과 회전에 의해 발생하는 마찰저항력과 비의 계산으로 가능하다. 바이어스 스프링력의 수준이 최대 500g/s 이하 이어야 하므로, 이는 회전이 있는 탄의 최소 가속도와 비교할 때 무시될 수 있는 수치이다. 따라서 여기에서는 지그재크 캠의 영향과 바이어스 스프링력은 고려하지 않는다.

따라서 Fig.1에서 캠과 슬리브의 측면 마찰력은 각가속도와 원심력의 합력으로 표현된다.

$$F_R = (Fa^2 + F_c^2)^{1/2} = [(m_z r_s a_t) + (m_z r_s \omega_t^2)]^{1/2} \quad (8)$$

여기서  $m_z$ 는 지그재크 캠의 질량,  $r_s$ 는 회전축에서부터 지그재크 캠의 중심까지의 거리,  $a_t$ 는 가속도 그리고  $\omega_t$ 는 각속도이다.

포장 내에서의 속도  $v_t$ 와 가속도  $a_t$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_t = \frac{\omega_t}{2\pi} BT_w \quad (9)$$

$$a_t = \frac{\alpha_t}{2\pi} BT_w \quad (10)$$

여기서  $B$ 는 포의 내경,  $T_w$ 는 Twist의 역수 (Turn/Caliber)이다.

식(9) 및 식(10)을 각속도  $\omega_t$  및 각가속도  $\alpha_t$ 에 대

하여 정리한 후 식(8)에 대입하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$F_n = \frac{2\pi m_z r}{BT_w} [a_t^2 + (\frac{2\pi}{BT_w})^2 v_t^4]^{1/2} \quad (11)$$

또한 관성력은

$$F_s = m_z a_t \quad (12)$$

이므로, 가속도에 의한 관성력과 회전에 의한 측면 마찰력과의 비( $R$ )는 다음과 같다.

$$R = \frac{F_s}{\mu F_R} = \frac{a_t BT_w}{2\pi \mu r_s [a_t^2 + (\frac{2\pi}{BT_w})^2 v_t^4]^{1/2}} \quad (13)$$

따라서  $R > 1$  이면 지그재크 캠은 작동한다고 볼 수 있다.

## 3. 실험

실험은 지그재크 캠의 운동에 필요한 속도변화량을 얻기위한 것으로 Air-gun 및 충격(shock)시험을 실시하였다. 실험을 위한 시스템의 구성 및 제원은 Fig.2 및 Table 1과 같으며, 실험방법등은 참고문헌<sup>(6)</sup>에 상세히 기술되어 있다. 여기서 캠 슬리브는 지그재크 캠 외부의 원통 벽면으로 핀(guide pin)은 여기에 고정되어 있다. 그리고 잠금스프링(lock spring)은 지그재크 캠이 완전히 이동한 후 스프링력에 의하여 다시 복원되지 않도록 하기위한 실험목적으로 사용되었다. 이 스프링은 선경이 0.2mm로 지그재크 캠에 수평력을 가하고 있으나 작동가속도의 바이어스 수준을 변경시킬 만큼 심각한 것이 아니므로 이론해석에서는 무시하였다.

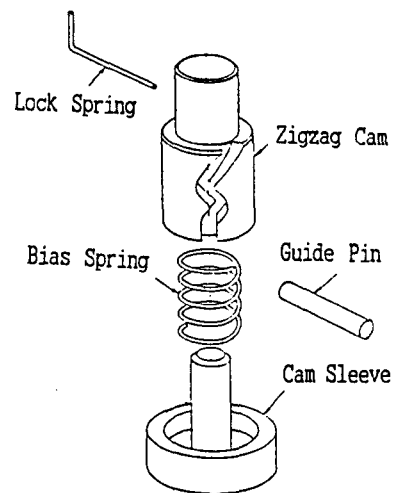


Fig.2 Zigzag cam system for shock and air-gun test

Table 1. Dimensions of the cam system

Type	Symbol	Value	
Cam	All type	$W_c$	0.6 gr
		$k$	2.7 mm
		$r$	2.7 mm
		$\alpha$	48.5°
	1-track	$x_1$	4.19 mm
	2-track	$x_1/x_2$	2.29/4.19mm
3-track	$x_1/x_2/x_3$	1.14/2.28/4.19mm	
Bias spring	$X_o$	12.46 mm	
	$k_s$	11.0 gr/mm	
Coefficient of friction	$\mu$	0.2	
Rarial location of cam	$r_s$	25mm	

4. 결과고찰

4.1 안전 민감도 해석

본 연구에서는 가속도를 받는 지그재그 캠의 운동 방정식을 유도하여 가속도에 따른 속도변화곡선을 획득하였으며, 실험을 통해 본 방정식의 유용성을 확인하였다.

Fig.3은 캠이 움직이는데 필요한 가속도와 최소

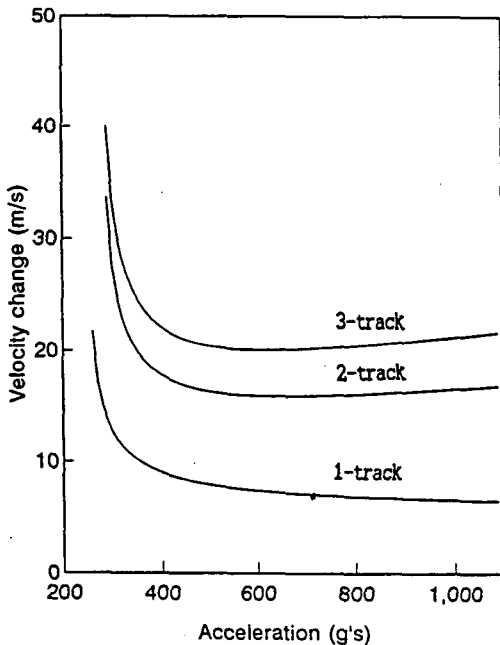


Fig.3 Theoretical velocity change curves on the rectangular pulse for zigzag cam types

속도변화량의 관계를 나타낸 것으로 속도변화곡선의 상부는 캠의 운동영역을, 하부와 좌측은 캠이 운동할 수 없는 영역을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 지그재그 트랙이 한 개인 1-트랙은 가속도의 증가에 따른 속도변화량이 계속 감소하나, 2-트랙과 3-트랙은 가속도의 증가에 따라 속도변화량이 감소하다가 다시 증가함을 보여주고 있다. 이는 아무리 큰 가속도가 있어도 충분한 속도변화량, 즉 가속도가 작용하는 일정량의 시간이 필요함을 알 수 있다. 또한 캠이 움직이는데 필요한 최소한의 가속도는 지그재그 트랙의 수에 관계없이 거의 일정하나 속도변화량은 지그재그 수에 따라 달라지고 있음을 알 수 있다. 이는 바이어스 스프링 수준이상의 가속도가 오래동안 작용하면 지그재그 캠이 작동됨을 알 수 있다.

Fig.4, 5, 6은 Air-gun실험 및 충격(Shock)실험 결과를 계산결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 18m/s 상부에서의 데이터 군은 Air-gun실험 결과치이며, 15m/s 하부에서의 데이터 군은 충격실험 결과치이다. 2-트랙 및 3-트랙의 지그재그 캠 실험에서 속도변화곡선 근접에서의 결과치 획득은 실험장비의 특성상 불가능하였다. 따라서 정확한 결과 분석에 아쉬움이 있으나, 낮은 속도변화 곡선을 유지하고 있는 1-트랙 모델에서의 실험결과는 이론치와 정확하게 일치하므로 2-트랙 및 3-트랙의 결과도 이론치와 일치할 것으로 예상할 수 있다.

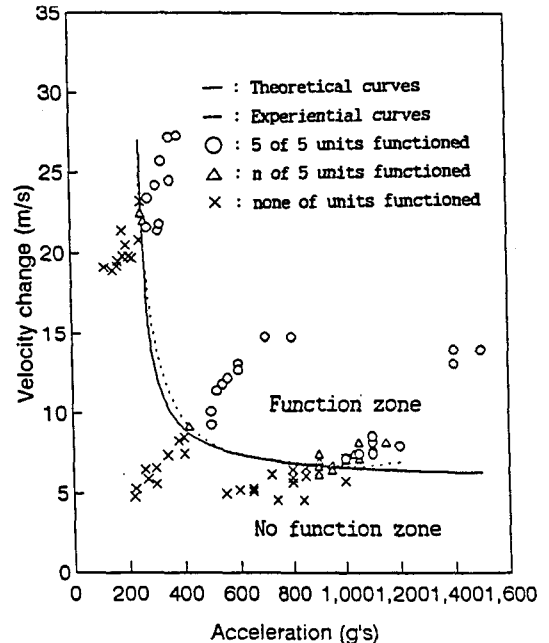


Fig.4 1-track zigzag sensitivity analysis compared to air-gun and shock test results

이 실험은 동일한 조건하에서 5조씩 실시하였으며, 5:조 전량작동(○)과 전량비작동(×) 그리고 일부수량 작동(△)으로 나타낸 것이다.

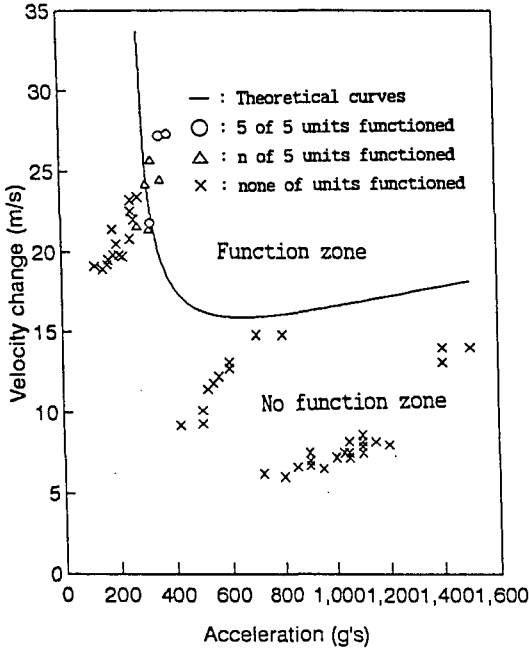


Fig.5 2-track zigzag sensitivity analysis compared to air-gun and shock test results

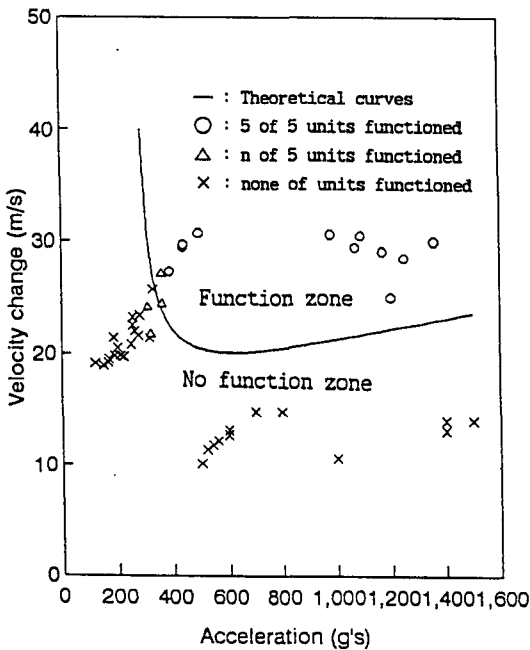


Fig.6 3-track zigzag sensitivity analysis compared to air-gun and shock test results

#### 4.2 작동 민감도 해석

Fig.7은 현재 알려져 있는 탄 중에서 최저의 가속도<sup>(6)</sup>가 캠에 작동할 때의 캠의 운동상태를 도식으로 나타낸 것으로 각 트랙을 따라 움직이는 캠의 운동변위에 따라 운동 소요시간과 그때의 필요한 속도 변화량을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 사각형 펄스의 크기는 참고문헌<sup>(6)</sup>의 가속도 곡선을 사각형 펄스로 환산하였고, 해석모델은 3-트랙의 모델을 사용하였다. 이 그림에서 보는바와 같이 현재 사용중인 탄의 가장 낮은 가속도에서도 원활한 작동이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig.8의 해석에서 지그잭 캠의 위치는 회전축에서 가장멀리 위치한 곳, 즉 설계 가능하고, 작동성이 최악의 조건인  $r=25mm$ 을 선정하였다.

그림에서 같이 5ms에서 최대가속도 13,140g/s이고, 이때의 R값이 55로 나타나고 있다. 이 R값의 의미는 원통형 지그잭 캠이 회전에 의해 생기는 측면 마찰저항력 보다 가속도에 의한 관성력의 크기가 55나 됨을 의미한다.

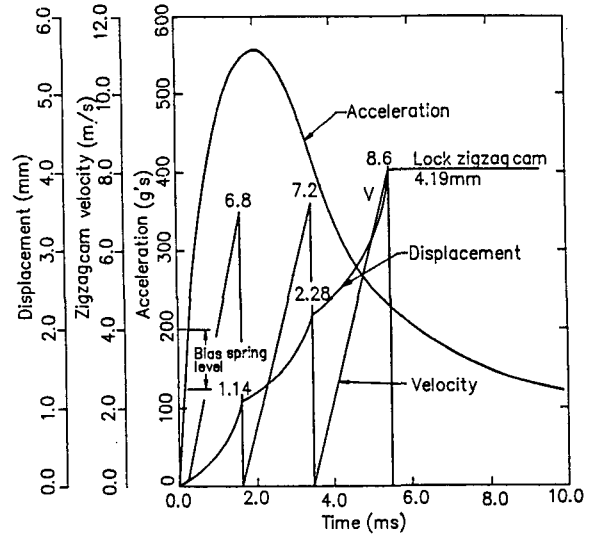


Fig.7 Theoretical velocity and displacement curves of zigzag sensor on time for minimum acceleration in 60mm mortar

그러나 가속도는 정점에서 부터 감소하고, 속도는 계속 증가하므로 R값이 급속도로 떨어지고 있음을 유의할 필요가 있다. 즉 가속도센서 설계시 캠의 운동시간은 최대가속도 발생시점 이전으로 하는 것이

바람직하며, 운동시간이 이보다 길면 정밀검토가 이루어져야 할 것이다.

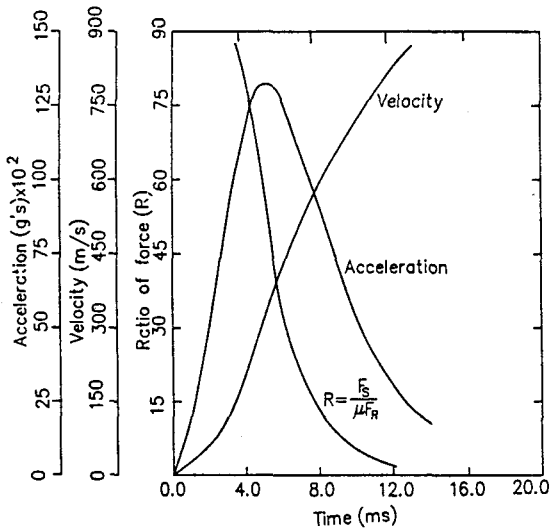


Fig.8 Drive acceleration, velocity and computed ratio(R) of drive force( $F_s$ ) to resisting force ( $\mu F_R$ ) at time for 155 HOW M185, M548, Zone 8

### 5. 결론

본 연구에서는 가속도를 받는 지그잭 캠의 운동을 해석하여 신관용 스위치로 사용가능성을 확인하였으며, 이 방정식을 통하여 지그잭 트랙의 수에 따른 안전 및 작동 민감도를 고찰하였다. 또한 회전력이 캠에 미치는 영향을 해석하여 회전탄에서의 작동성도 조사하였다. 그리고 3종의 지그잭 캠 모델을 제작하여 실험을 통해 캠이 작동하는데 필요한 속도변화량을 획득하여 해석결과와 비교하였다. 본 연구에서 얻은진 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

- 지그잭 가속도센서는 일정량의 가속도와 속도변화량이 있어야 작동하므로 신관의 기본 안전조건을 만족시킨다.

- 지그잭 가속도센서는 화포용 모든 신관의 설계조건을 모두 만족시킨다.

- 지그잭 가속도센서 시스템은 편-불-편 시스템에 비하여 단순하고 소형으로 제작 가능하다. 또한 신관용 배터리 스트라이커, 안전장치의 구속기구로도 사용 가능함을 예상할 수 있다.

### 참고문헌

1. 1991, "Fuze Design Safety Criteria for", MIL-STD-1316D, Department of Defense, Washington, D.C
2. Overman, D. L., 1973, "Rectangular Pulse Sensitivity Analysis for Single Element Spring Mass Systems", Harry Diamond Laboratories, Washington, D.C
3. George, W.C., 1973, "Design, Development, and Testing of a Zigzag Setback Safety Mechanism for Munition Fuzing", DAAG39-73-C-0236, Harry Diamond Laboratories, Washington, D.C
4. Overman, D. L., 1989, "Development of Equations Motion for Helix-Driven Flywheel Device", Harry Diamond Laboratories, Washington, D.C
5. 이영신, 김경환, 명창문, 이명준, 1995, "추진력을 받는 원통형 지그잭센서의 안전 민감도 해석," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제11호, pp. 2797~2805.
6. Heppner, L. D., 1974, "Setback and Spin for Artillery, Mortar, Recoilless Rifle, and Tank Ammunition", AGP-MT-4503. US Army Aberdeen Proving Ground, Maryland.