

# 비행체 진입각을 이용한 공중 폭발고도 계측 방법

김진호<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제8기술연구본부

## Measurement Method of Airburst Height Using the Approach Angle

Jinho Kim<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 8th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 3 February 2017 / Revised 19 May 2017 / Accepted 21 July 2017)

### ABSTRACT

This paper proposes a method to measure the airburst height by utilizing a high speed camera. This method might be applied to the test of which flight target is alive after the burst. The proposed method consists of four main steps. The first step is to compute the impact point using the sea surface height. The second step is to compute the height of burst (HOB) by using the distance from the camera to the impact point. This could be different from the real explosion height. That is because the distance from the camera to the burst point is not the same as it from the camera to the impact point. Therefore, the third step is to calculate the approach angle of the flight target with respect to the installed camera. Then, the last step is to compensate the computed height by using the approach angle. The result of the proposed method is compared with it from the triangulation. In this paper, the HOB error is also analyzed regarding the approach angle difference. Based on this analysis, the camera position might be suggested for error reduction.

Key Words : Airburst Height(공중 폭발고도), High Speed Camera(고속카메라), Flight Attitude(비행자세)

### 1. 서론

무기체계의 비행성능 시험은 종말 탄착현상을 영상으로 확인하기 위한 다양한 광학계측을 요구한다<sup>[1-4]</sup>. 이를 위해 시험장은 고속카메라, 적외선카메라 그리고 광학추적장비를 운용하고 있다. 최근 들어 무기체계

비행성능 시험은 고속카메라와 적외선카메라를 이용한 단순한 이벤트 현상 계측뿐만 아니라 탄착 위치, 종말속도, 비행 자세 등의 정량적인 광학계측을 요구하고 있다<sup>[1-4]</sup>. 또한 유도무기에 근접작동 기능을 갖는 전자신관이 적용되면서 신관의 근접작동 기능을 평가하기 위한 목적으로 신관의 공중 폭발고도에 대한 계측 요구도 증가하고 있는 실정이다<sup>[5-8]</sup>. 공중 폭발고도는 폭발 중심점으로부터 지면 또는 해수면까지의 수직 직선 길이를 의미한다.

\* Corresponding author, E-mail: jinho99@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

광학계측 시험수행 절차는 광학장비의 운용 대수에 따라 탄착위치 및 공중 폭발고도를 측정하기 위해 다양한 시험 수행방안을 포함한다<sup>5)</sup>. 탄착지점을 기준으로 60~120° 사이의 각을 이루도록 광학장비 2대를 설치할 수 있는 경우는 삼각측량법을 활용하여 탄착 위치 또는 공중폭발고도를 계측한다<sup>5,6)</sup>. 광학장비를 3대 운용할 수 있고 세 교점이 이루는 면적이 일정 기준 면적 이하일 경우는 세 교점의 중심점을 표적의 위치로 계산할 수 있다<sup>5)</sup>. 광학장비를 4대 이상 운용하는 경우는 임의의 광학장비 3대를 선택해서 탄착위치 또는 공중폭발고도를 계산한다<sup>5)</sup>. 삼각측량법을 적용하기 어려운 경우는 발사체의 위치와 발사 방향을 활용하여 광학장비 1대로 신관의 공중 폭발고도를 계측한다<sup>5)</sup>.

국내시험장의 경우는 대부분 해상 근접신관시험에 대한 공중 폭발고도를 계측하고 있다<sup>6,7)</sup>. 해상 근접신관은 폭발 시 짧은 순간에 빛, 열, 폭음 그리고 화염과 파편을 비산시켜 해상에 수초간 물기둥을 형성시킨다<sup>6)</sup>. 해상 근접신관의 폭발고도는 화염의 폭발중심점에서 물기둥으로 확인할 수 있는 해수면까지의 수직 직선 길이로 정의될 수 있다<sup>6,7)</sup>. 한편 국내시험장에서는 고속카메라 두 대를 육상에 설치하여 삼각측량법으로 근해에서 발생하는 공중 폭발고도를 계측<sup>6)</sup>하거나 레이더에 설치되어 있는 비디오카메라를 활용하여 공중 폭발고도를 계측하여 왔다<sup>7)</sup>.

그러나 무기체계의 사거리가 중대되고 공중 폭발고도가 낮아지면서 육지에서 고속카메라 두 대를 운영하는 방식의 광학계측이 불가해지고 또한 레이더에 설치되어있는 비디오카메라를 활용한 계측에도 제한이 발생되고 있다. 또한 무기체계가 특정 섬 안에 탄착하는 경우는 레이더의 운용이 불가하고 광학장비를 인근 섬 또는 탄착지에 이동 설치하여 공중폭발고도를 계측한다. 이때에도 탄착지 및 인근 섬의 위치 특성상 폭발이 원거리 해상에서 이루어지거나 고속카메라 설치가 제한적일 경우는 탄착점을 기준으로 60~120°의 각을 이루도록 두 대 이상의 광학장비를 설치하는 것 자체가 곤란해져 삼각측량법을 적용할 수 없게 된다.

따라서 본 논문에서는 고속카메라 한 대를 활용하여 공중폭발고도를 계산하는 방안을 제안하고자 한다. 적용가능 시험은 공중 폭발 후에도 무기체계의 형상이 보존되어 탄착위치를 영상으로 확인 가능한 경우이다. 먼저 탄착위치는 GPS 측량기를 직접 이용하거나, 육지 또는 해수면의 고도를 알고 있다면 영상자료를 활용하여 계산한다. 탄착위치를 이용하여 공중 폭

발고도를 계산할 수 있지만, 고속카메라로부터 탄착위치와 폭발위치 사이의 거리가 상이한 경우 공중 폭발고도에 오차가 발생한다. 따라서 비행체의 진입각을 활용하여 공중 폭발고도를 보정하여 계산하여야 한다.

## 2. 기존 공중 폭발고도 계측 방법 고찰

본 장에서는 공중 폭발고도를 계측하는 기존 방안을 정리하였다. 광학 장비의 설치가 제한적인 경우는 광학장비 한 대의 정보와 발사 정보를 활용하여 공중 폭발고도를 계산한다. 광학장비의 설치가 용이한 경우는 다수의 광학장비를 운용하고 삼각측량법을 적용한다. 또한 레이더와 함께 운용하는 경우는 거리정보를 활용하여 공중 폭발고도를 계산한다.

먼저, 광학장비 1대를 운용하여 공중 폭발고도를 계측하는 방법은 Fig. 1과 같이 무기체계의 발사 위치와 발사 방향을 이용하여 탄착위치 또는 공중 폭발고도를 계산한다<sup>5)</sup>. 하지만 무기체계의 발사 방향은 실제 진행방향과 차이가 있으므로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 오차가 존재할 수 있다. 광학장비의 설치 및 운용이 제한적일 경우에 활용하는 방안이다.

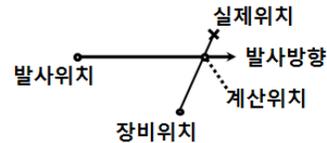


Fig. 1. Measurement by a camera

광학장비 두 대 이상을 운용하여 계측하는 방안은 삼각측량법을 이용하여 표적의 3차원 위치를 계산한다<sup>5,6)</sup>. 광학장비 두 대를 운용하는 경우는 Fig. 2와 같이 두 직선의 교점을 계산하여 무기체계의 탄착위치 또는 공중 폭발위치를 획득할 수 있다. 지면 또는 해수면의 고도는 측량하거나 영상정보를 활용하여 계산하고 공중 폭발고도를 획득한다.

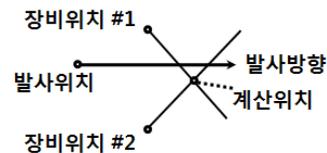


Fig. 2. Measurement by two cameras

광학장비 세 대를 운용하는 경우는 먼저 Fig. 3과 같이 세 직선의 교점을 계산한다. 세 교점이 이루는 삼각형의 면적이 일정 크기 이하일 경우 삼각형의 중심점을 계산하여 표적의 위치를 획득한다<sup>[5]</sup>. 광학장비 4대 이상을 운용하는 경우는 광학장비 세 대를 임의로 선택하여 Fig. 3과 같은 방법으로 위치를 계산한다<sup>[5]</sup>.

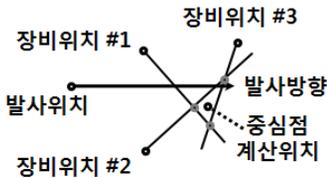


Fig. 3. Measurement by three cameras

또한 레이더나 레이저 거리 측정기와 같이 광학장비로부터 폭발지점까지의 거리를 계측할 수 있는 장비를 같이 운용하는 방안이 있다. Fig. 4와 같이 해상 근접신관의 경우는 폭발 시 짧은 순간에 빛, 열, 폭음 뿐만 아니라 화염과 파편을 비산시켜 물보라를 수초간 형성시킨다<sup>[6]</sup>. 따라서 Fig. 4에 표시한 것과 같이 화염의 중심점에서 물보라까지의 수직 직선에 해당하는 화소 수를 읽으면 광학장비로부터 폭발지점까지의 거리를 이용하여 폭발고도를 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.



Fig. 4. HOB measurement of sea impact test

$$HOB = \frac{p \times c \times R}{f} \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 비디오카메라 화소의 크기( $\mu\text{m}$ ),  $f$ 는 렌즈의 초점 거리( $\text{mm}$ )이다.  $c$ 는 Fig. 4에 표시한 것과 같이 폭발중심 점에서 물보라까지의 수직 직선에 대한 화소 수이다.  $R$ 은 레이더나 레이저 거리 측정기로 획득한 광학장비로부터 폭발지점까지의 거리이다.

### 3. 비행체 진입각을 이용한 폭발고도 계측 방법

레이더와 비디오카메라를 활용한 기존 공중 폭발고도 계측 방법은 무기체계의 사거리가 증대되고 신관 작동 고도가 낮아지면서 점차 적용하기 어려워지고 있다. 광학장비는 레이더와 비교하여 이동 설치가 용이하기 때문에 특정 섬 근처 또는 섬 안에서 신관이 작동하는 시험도 적용이 가능하다. 하지만 삼각측량법을 활용하는 방안도 무기체계가 인근 섬의 원거리 해상에서 폭발하거나 광학장비의 설치가 제한적인 경우에는 적용하기 어렵다.

최근 전자신관이 적용된 유도무기 시험은 공중 폭발고도뿐만 아니라 탄착 위치, 종말 비행자세, 탄착 속도 등의 종말 비행현상에 대한 정량적인 분석을 요구한다. 공중 폭발고도와 함께 다양한 종말 비행현상을 정량적으로 분석하기 위해 화약량을 극소로 제한하여 Fig. 5와 같이 공중 폭발 후에도 무기체계의 형체가 남아있고 기존 궤적대로 비행하도록 시험을 수행한다. 본 장에서는 이와 같이 공중 폭발고도와 다양한 종말 비행현상에 대한 분석이 함께 요구되는 시험에서 고속카메라 한 대만을 이용하여 공중 폭발고도를 계산하는 방안을 제안한다.



Fig. 5. Sea impact test with limited explosion

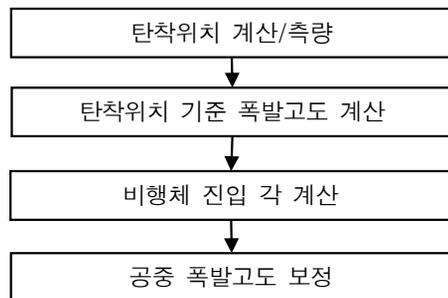


Fig. 6. Flow chart of proposed method

제안하는 방안은 공중 폭발고도를 획득하기 위해 Fig. 6과 같이 네 단계의 계산을 수행한다. 먼저, 탄착 위치를 계산하거나 측량한다. 그리고 식 (1)을 적용하여 탄착 위치를 기준으로 공중 폭발고도를 계산한다. 일반적으로 탄착위치 기준 공중 폭발고도는 실제 공중 폭발고도와 차이가 있기 때문에 광학장비를 기준으로 비행체의 진입 각을 계산하고, 공중 폭발고도를 보정 계산한다.

3.1 탄착위치 계산/측량

고속카메라를 한 대만 운용하는 경우는 삼각측량법을 적용할 수 없고 표적까지의 거리를 알지 못하기 때문에 임의의 프레임에 대해서 표적의 3차원 위치를 계산할 수 없다. 따라서 지표면 또는 해수면의 고도를 이용하여 표적의 탄착위치를 먼저 계산한다. 탄착위치는 측량기를 운용하여 획득할 수도 있고 영상 정보를 이용하여 계산할 수도 있다.

영상 정보를 활용하여 탄착위치를 계산하기 위해서는 장비의 위치, 방위각, 고각, 지면 또는 해수면의 높이를 알고 있어야 한다. 광학장비의 위치는 WGS84 좌표로 획득하고 특정 기준점에 대한 직각좌표계로 변환한다. 이 때, 일반적으로 x축은 북쪽 방향, y축은 동쪽 방향, z축은 수직축을 나타낸다. 광학추적장비를 운용하는 경우의 방위각과 고각은 컴퓨터에 디지털로 저장되거나 영상 내에서 확인할 수 있고, 고정형 광학장비를 운용하는 경우에는 기준 폴 등을 이용하여 영상 내 임의의 화소에 대한 방위각과 고각을 계산할 수 있다. 지면 높이는 측량으로 확인하나 해수면 높이는 측량 또는 조석표 등의 정보를 활용한다.

Fig. 7은 거리  $r$ , 방위각  $\alpha$ , 고각  $\varphi$ 에 대한 점 P의 위치를 나타내었다. 극좌표  $(r, \varphi, \alpha)$ 는 직각좌표계에서  $(r \cos \varphi \cos \alpha, r \cos \varphi \sin \alpha, r \sin \varphi)$ 로 변환된다. Fig. 8은 광학장비의 위치와 탄착위치의 관계를 나타낸다. 3차원 공간상에서  $(X_o, Y_o, H_o)$  위치에 설치되어 있고 방위각  $\alpha$ , 고각  $\varphi$ 를 지향하는 카메라는 식 (2)와 같이 점  $(X_o, Y_o, H_o)$ 를 지나고  $(1, \varphi, \alpha)$ 를 방향벡터로 갖는 직선의 방정식으로 생각할 수 있다. 그리고 주어진 고도  $H_p$ 에 따른 탄착위치  $X_i, Y_i$ 는 식 (3), 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\frac{X - X_o}{\cos \varphi \cos \alpha} = \frac{Y - Y_o}{\cos \varphi \sin \alpha} = \frac{Z - H_o}{\sin \varphi} \tag{2}$$

$$X_i = X_o + \cos \varphi \cos \alpha \left( \frac{H_p - H_o}{\sin \varphi} \right) \tag{3}$$

$$Y_i = Y_o + \cos \varphi \sin \alpha \left( \frac{H_p - H_o}{\sin \varphi} \right) \tag{4}$$

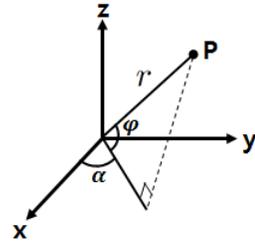


Fig. 7. Polar coordinate system

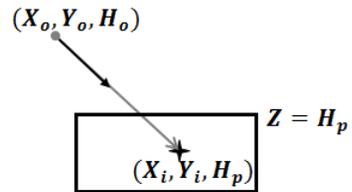


Fig. 8. Impact point computation

3.2 탄착위치 기준 폭발고도 계산

탄착위치 기준 공중폭발고도는 식 (1)을 적용하여 계산한다. 고속카메라 화소의 크기  $p$ 와 렌즈의 초점 거리  $f$ 는 고속카메라 교정 작업을 수행하여 획득한다. 공중폭발 위치와 탄착위치 간의 높이 차이에 해당하는 화소 수  $c$ 는 Fig. 9와 같이 서로 다른 프레임에서 해당 위치를 확인하고 획득한다. 광학장비에서 탄착위치까지의 거리  $R$ 는 3.1절에서 계산한 탄착위치를 이용하여 계산한다.



Fig. 9. HOB measurement of ground impact test

### 3.3 비행체 진입각 계산

Fig. 10과 같이 광학장비를 기준으로 탄착 위치와 폭발 위치까지의 거리가 다른 경우는 탄착위치 기준 공중 폭발고도와 실제 공중 폭발고도 간의 차이가 발생한다. 본 논문에서는 고속카메라를 기준으로 비행체의 진입각을 계산하여 이때 발생하는 오차를 보정하였다.

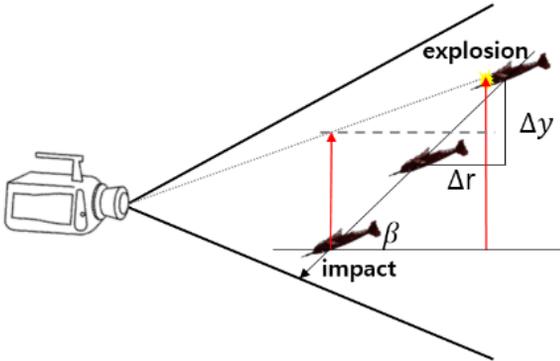


Fig. 10. Approach angle computation

비행체의 진입각  $\beta$ 는 Fig. 10에서 보는 것과 같이 비행체의 비행 방향이 일정하다고 가정하며 식 (5)와 같이 비행체가 다가온 거리  $\Delta r$ 과 비행체의 낙하 거리  $\Delta y$ 를 이용하여 계산한다.

$$\tan \beta = \frac{\Delta y}{\Delta r}, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta r} \quad (5)$$

$\Delta y$ 는 영상에서 낙하 거리에 해당하는 화소 수를 나타낸다.  $\Delta r$ 은 광학장비를 기준으로 비행체까지의 거리의 변화이고 z축 성분이기 때문에 영상 내에서 비행체의 크기를 이용하여 계산한다.

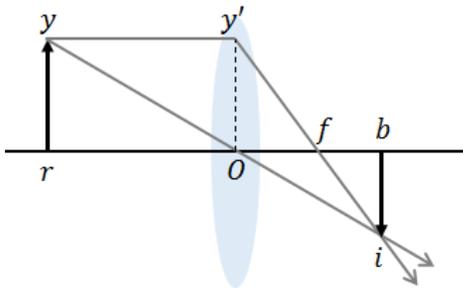


Fig. 11. Light refraction by convex lens

Fig. 11은 볼록렌즈에 의한 빛의 굴절을 보여준다. Fig. 11에서  $\Delta ory$ 와  $\Delta obi$ ,  $\Delta foy'$ 과  $\Delta fbi$ 는 닮음이므로 삼각형의 닮음비를 정리하면 식 (6)을 확인할 수 있다. 식 (6)에서  $r$ 은 카메라에서 대상체까지의 거리이며  $b$ 는 렌즈에서 센서까지의 거리,  $f$ 는 초점거리이다. 광학계측 업무를 수행하는 환경은 카메라에서 대상체까지의 거리가 수 백 m이고, 운용렌즈의 초점거리는 수 십~수 백 mm이다. 따라서  $r \gg f, b$ 이고,  $f \approx b$ 로 근사할 수 있으므로 삼각형 닮음비를 이용하여 식 (7)을 확인할 수 있다.  $i$ 는 영상 내 대상체의 화소 수를 나타낸다.

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$r : f = y : i \quad (7)$$

$\Delta r$ 을 계산하기 위해  $y$ 는 비행체의 길이  $v$ 로,  $i$ 는 비행체가 영상 내에서 차지하는 화소 수  $c_r$ 로 대체한다. 식 (7)을 거리  $r$ 에 대해 정리하면 식 (8)과 같고, 초점거리  $f$ 와 비행체의 실제 길이  $v$ 가 거리에 따라 변하지 않기 때문에  $\Delta r$ 은 식 (9)와 같다.

$$r = \frac{f \cdot v}{c_r} \quad (8)$$

$$\Delta r = \Delta \left( \frac{f \cdot v}{c_r} \right) = f \cdot v \cdot \Delta \left( \frac{1}{c_r} \right) \quad (9)$$

$\Delta y$ 는 비행체가 낙하한 화소 수에 대한 식으로 표현된다. 거리  $r$ 을 일정하게 고정시켜  $R$ 로 대체하고  $i$ 를 비행체가 위치한 픽셀  $c_y$ 로 대체하면 식 (10)과 같다. 비행체가 낙하하면서 거리  $R$ 과 영상 내 비행체의 길이가 달라지지만 그 변화량이 작으므로 근사적으로 거리  $R$ 을 고정시킨다. 초점거리  $f$ 는 변하지 않는 값이므로  $\Delta y$ 는 영상 내에서 비행체가 낙하한 화소 수  $\Delta c_y$ 에 대한 식 (11)과 같다.

$$y = \frac{c_y \cdot R}{f} \quad (10)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta c_y \cdot R}{f} \quad (11)$$

식 (5)에 식 (9)와 식 (11)의  $\Delta y$ ,  $\Delta r$ 을 대입하면 광학 장비 기준 비행체 진입각  $\beta$ 에 대한 식을 식 (12)와 같이 얻을 수 있다. 여기서  $C = \frac{f \cdot v}{R}$ 는 비행체가 영상 내에서 차지하는 픽셀 크기이며,  $f$ 는 초점거리,  $v$ 는 비행체 길이 그리고  $R$ 은 거리이다.  $\Delta c_y$ 는 영상 내에서 비행체가 낙하한 화소 수이며,  $\Delta\left(\frac{1}{c_r}\right)$ 은 영상 내에서 비행체가 차지하는 화소 수의 역수의 변화량이다.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{\Delta c_y \cdot R}{f}}{f \cdot v \cdot \Delta\left(\frac{1}{c_r}\right)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta c_y \cdot R}{f^2 \cdot v \cdot \Delta\left(\frac{1}{c_r}\right)}\right)$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{\Delta c_y}{f \cdot C \cdot \Delta\left(\frac{1}{c_r}\right)}\right) \quad (12)$$

### 3.4 공중 폭발고도 보정 계산

탄착 위치를 기준으로 계산한 공중 폭발고도는 앞에서 설명한 것과 같이 실제 공중 폭발고도와 차이가 있다. 실제 공중 폭발고도는 고속카메라로부터 실제 폭발 위치까지의 거리를 알지 못하기 때문에 Fig. 12와 같은 기하학적 정보를 이용하여 탄착위치 기준 공중 폭발고도를 보정하여 계산한다.

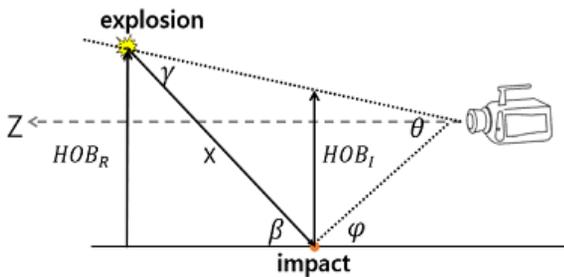


Fig. 12. HOB compensation

Fig. 12에서  $\theta$ 는 신관이 작동하는 프레임과 비행체가 탄착하는 프레임에서 표적의 위치 차이에 해당하는 각도이며 식 (13)과 같이 계산한다. 식 (13)에서  $c$ 는 영상 내 해당 화소 수,  $p$ 는 고속카메라 센서의 픽셀 크기( $\mu\text{m}$ )이며  $f$ 는 렌즈의 초점 거리( $\text{mm}$ )이다.  $\gamma$ 는 식 (14)와 같이 계산할 수 있으며  $\beta$ 는 광학장비 기준 비행체 진입각이고,  $\varphi$ 는 탄착 지점을 지향하는 광학

장비의 고각을 나타낸다.

$$\theta = \tan^{-1}\frac{c \times p}{f} \quad (13)$$

$$\gamma = \beta - \theta + \varphi \quad (14)$$

$HOB_I$ 는 탄착위치를 기준으로 계산한 공중 폭발고도를 나타내며  $HOB_R$ 은 비행체의 진입각을 이용해 보정한 공중 폭발고도를 나타낸다. 삼각함수의 사인법칙으로부터 식 (15)와 같이 정리할 수 있으며  $x$ 에 관하여 정리하면 식 (16)과 같다. 식 (14)와 식 (16)을 식 (17)에 대입하여 정리하면 식 (18)과 같은  $HOB_R$ 에 대한 일반식을 구할 수 있다.

$$\frac{\sin \gamma}{HOB_I} = \frac{\sin(90 + \theta - \varphi)}{x} \quad (15)$$

$$x = \frac{HOB_I}{\sin \gamma} \times \sin(90 + \theta - \varphi) \quad (16)$$

$$HOB_R = x \times \sin \beta \quad (17)$$

$$HOB_R = HOB_I \times \frac{\sin(90 + \theta - \varphi)}{\sin(\beta - \theta + \varphi)} \times \sin \beta \quad (18)$$

## 4. 실험 및 결과 분석

본 논문에서 제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 13과 같은 육상 탄착 시험에 적용하였다. 제안하는 방법과 삼각측량법을 동시에 적용하여 계산한 공중 폭발고도 값을 비교하였다.

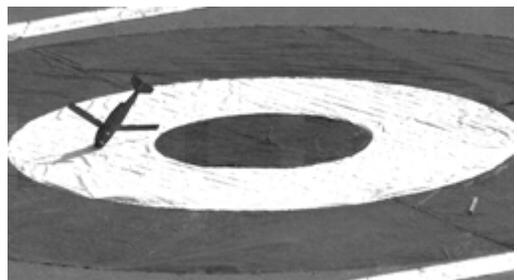


Fig. 13. HOB measurement test

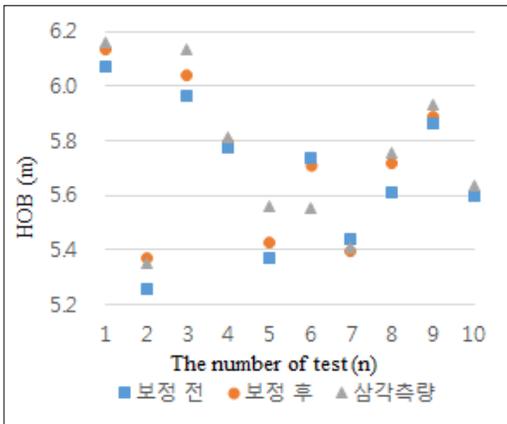


Fig. 14. HOB result comparison

Table 1. Result comparison between proposed method and triangulation

제안하는 방안		기존 방안	차이
보정 전	보정 후	삼각측량	
6.07	6.14	6.16	0.4 %
5.26	5.37	5.35	0.3 %
5.97	6.04	6.13	1.5 %
5.77	5.80	5.81	0.3 %
5.37	5.43	5.56	2.4 %
5.74	5.71	5.55	2.8 %
5.44	5.40	5.41	0.2 %
5.61	5.72	5.75	0.6 %
5.86	5.89	5.93	0.7 %
5.60	5.60	5.63	0.6 %

Table 1과 Fig. 14에 비행체 진입각을 이용하여 보정한 공중 폭발고도 값과 삼각측량법을 적용하여 계산한 값을 비교하였다. 10회의 시험결과에 대하여 제안하는 방법에 의한 값의 평균은 5.710, 표준편차는 0.2660이며 삼각측량법에 의한 값의 평균은 5.728, 표준편차는 0.2808이다. 제안하는 방법에 의한 값과 삼각측량법에 의한 값을 통계분석 S/W인 SPSS v.18로 대응표본 T-검정한 결과 95 % 신뢰구간에서 검정통계량  $t = 0.751$ 로  $p = 0.472$ 이므로 두 계산결과 집단의 평균의 차이가 없다는 귀무가설을 기각할 수 없다. 따라서 비행체

진입각을 이용하여 보정한 결과는 삼각측량법을 적용한 결과와 통계적으로 유의한 차이가 없다.

광학장비 기준의 비행체 진입각은 삼각측량법으로 획득한 속도 벡터의 yaw각을 활용하여 계산할 수도 있다. 본 논문에서 제안하는 방법으로 획득한 진입각과 삼각측량법으로 계산한 값을 비교하면 Fig. 15와 같으며, 평균 1.5°의 차이를 보이고 최대 3° 정도의 차이를 갖는 것을 확인하였다.

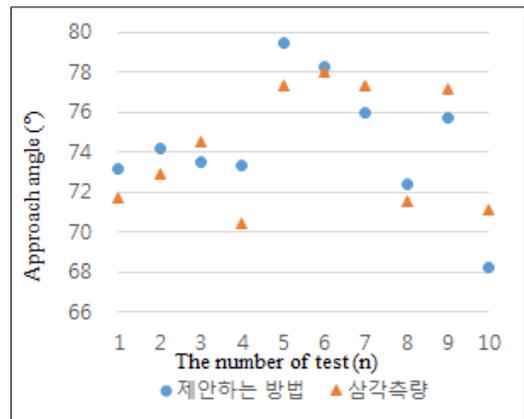


Fig. 15. Approach angle comparison

진입각에 따른 공중 폭발고도 보정 값을 분석하기 위해 Fig. 16과 같이 진입각을 변화시켜 가면서 보정되는 공중 폭발고도 값을 계산하였다. 진입각이 90°인 경우 보정값이 1이 되어  $HOB_I$  값과  $HOB_R$  값이 같다. 진입각이 75°인 경우, 탄착위치 기준 공중 폭발고도를 100 m로  $\theta$ 를 15°로 가정하면 보정된 공중 폭발고도는 107.7 m로 7.7 % 정도 보정해준다.

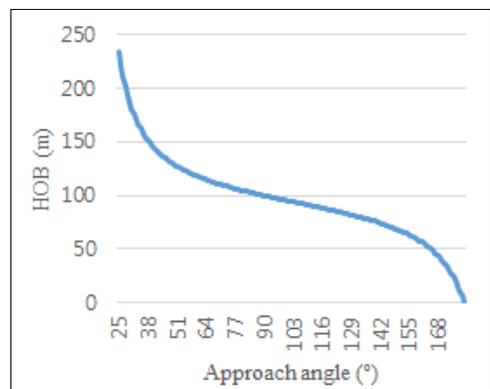


Fig. 16. Compensated HOB w.r.t approach angle

Fig. 17과 같이 진입각 차이에 따른 폭발고도 차이를 계산하고 분석하였다. 진입각이 75°인 경우는 진입각 분석 오차가 1° 정도 발생할 때 0.6 % 정도의 폭발고도 차이가 발생한다. 계측 오차를 1 % 이하로 감소시키기 위해서는 진입각이 최소 56° 이상 되도록 광학장비를 설치해야 한다.

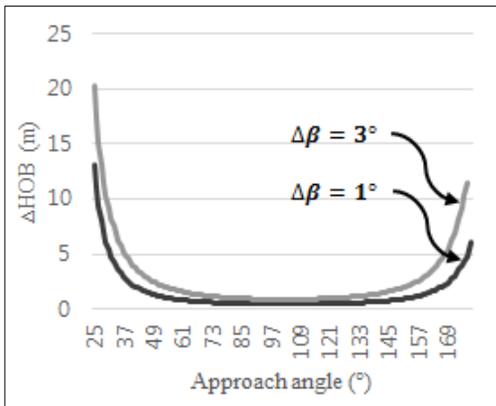


Fig. 17. HOB error w.r.t approach angle difference

## 5. 결론

본 논문에서는 고속카메라 한 대로 공중 폭발고도를 계측할 수 있는 방법을 제안하였다. 공중 폭발 후에도 비행체가 기존의 궤적을 유지하고 탄착하는 제한된 경우에 적용할 수 있다. 비행체 진입각, 공중폭발 위치, 탄착 위치, 그리고 광학계측 위치 간의 기하학적 관계로부터 보정식을 도출하였으며 광학장비를 두 대 이상 운용하여 삼각측량법으로 계산한 결과와 비교하였다. 본 논문에서 제시한 방법이 삼각측량법에 의한 공중 폭발고도 및 진입각 결과와 통계적으로 유의한 차이가 없음을 확인함으로써 타당성을 입증하였다.

진입각이 커짐에 따라 공중 폭발고도의 보정값은 작아지며, 제안하는 방안의 계측 오차를 1 % 이하로 감소시키기 위해서는 진입각이 56° 이상 되도록 광학장비를 설치해야 한다. 본 논문에서 제안하는 방법을 적용함으로써 최소의 광학장비를 운용하여 공중 폭발고도와 다양한 종말 비행현상에 대한 정량적 자료를 획득할 수 있게 되었다.

## References

- [1] J. Kang, H. Lee, "A Study on The Terminal Trajectory and Attitude Measurement Technique of Weapon System using High Speed Image," The 40<sup>th</sup> Anniversary Conference of Agency for Defense Development, pp. 163-166, Aug, 2010.
- [2] J. Kim, H. Kim, I. Seo, "Measurement Method of Flight Attitude Relating Flight Direction using High Speed Image," The 27<sup>th</sup> Workshop on Image Processing and Image Understanding, Feb, 2015.
- [3] J. Kim, H. Kim, "Flight Attitude Measurement Technique of Weapon System using High Speed Image", KIMST Autumn Conference Proceedings, Vol. 21, pp. 157-160, Nov, 2013.
- [4] J. Kim, H. Kim, "Flight Event Analysis Method using 3D Image Processing," The 28<sup>th</sup> Workshop on Image Processing and Image Understanding, Feb, 2016.
- [5] Final Report on Test Operation Procedure, "Location of Impact of Airburst Positions," TOP-3-2-825, Nov, 1976.
- [6] K Kang, et. al., "Measuring Technique for Height of Burst using Stereo-vision Recognition," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 194-203, June, 1999.
- [7] J. Choi, S. Hong, K. Kang, and J. Lyou, "Measurement Technique for Sea Height of Burst Using Image Recognition," The Institute of Control, Automation and Systems Engineering, KOREA, Vol. 2, No. 1, pp. 76-83, March, 2000.
- [8] S. Yun, B. Kim, T. Kim, S. Park, "Test and Analysis of Dispersion of DPICM Sub-Munition Using Triangulation Method," The 5<sup>th</sup> Test and Evaluation Symposium, Vol. 5, pp. 94-107, Sept, 2007.