

論文

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.4.300>

자체 항법 정보만을 이용한 비행 중 기압 고도계 설정 방법

정석영*

Procedure of Barometer Setting in Flight with On-board Navigation Data alone

Suk Young Jung*

ABSTRACT

In GPS/INS/barometer navigation system for UAV, two procedures were proposed in order to set three reference parameters for the pressure altitude of QNH or QFE settings, using the navigation data from on-board system alone. These procedures yield required the reference parameters through mathematical process with the altitude and the atmosphere properties measured for a short duration of flight, of which a special pattern is requested according to the selected procedure. Dependency only upon the on-board navigation data can eliminate a requirement for the atmospheric measurement system in the ground support system and can expand a flight boundary to a remote area where the ground support is not available. Especially the procedure with the regression method uses altitude and pressure but temperature to produce the three reference parameters. No need of temperature measurement for the pressure altitude system can simplify the on-board air data system.

초 록

무인기의 INS/GPS/기압고도계 결합항법 시스템에서 비행체 자체 항법 정보만을 이용하여 QNH 혹은 QFE 방식의 기압 고도계를 설정하는 방법을 제안한다. 본 설정 방법은 비행체 외부로부터 주어지는 대기나 고도 정보에 의존하지 않고 자체 항법 시스템의 정보만을 사용하며 설정 방법에 따라 요구되는 일정 형태의 비행을 통해 얻어진 정보를 수학적으로 처리하여 기준값을 산출한다. 비행체 자체 정보만을 사용함으로써 지상 지원 장비에서 대기 정보 측정 시스템을 제외하는 등 간소화나 지원 시설의 요구 조건이 완화될 수 있고 지상 지원이 가능하지 않는 영역에서의 비행도 가능하다. 특히 회귀 분석 기법을 이용한 방법은 고도와 기압, 온도의 세 가지 기준값을 설정함에 있어 고도와 기압, 두 가지 정보만을 요구하며 온도 자료가 필요하지 않다. 그러므로 기압 고도 산출에 온도 정보가 전혀 필요하지 않아 비행체의 대기 정보 측정 시스템도 간소화될 수 있다.

Key Words : Pressure Altitude Setting(기압 고도 설정), Standard Atmosphere(표준대기), INS/Barometer Navigation System(관성/기압고도 항법 시스템), Regression Model(회귀 모델), 최소 자승(Least Squares)

† 2010년 9월 10일 접수 ~ 2012년 3월 5일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

교신저자, E-mail: jungsy@add.re.kr

대전 유성우체국 사서함 35호 1-2

I. 서론

저고도에서 임무를 수행하는 무인기의 유도 조종과 항법에는 정확하고 지속적인 고도 정보의 제공이 가능한 INS/GPS/기압고도계 결합 항법이 널리 이용된다. GPS 등과 같은 위성 항법이 이용될 수도 있지만 운용의 제한점 등으로 기압 고도와 결합된 고도 측정 시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다.¹ 기압고도계의 고도 정보는 INS의 수직축 오차 성분의 발산을 방지하는데 사용된다. 기압고도계는 동정압관(Pitot-Static Tube)과 같은 압력 측정 장비를 통한 고도에 따른 공기 압력의 변화를 이용하여 고도를 제공한다. 동정압관 등 압력 측정 장치는 이미 기존의 항공기에서 기압 고도만이 아니라 항공기의 자세, 속도 등을 측정하기 위하여 장착되어 널리 사용되는 장비이다. 이들 장비는 비행체 주위의 압력을 측정하기 때문에 여러 요인에 의하여 대기압과 다른 오차를 갖게 되며² 이에 대해 많은 연구가 이루어졌으며 정석영 등³은 이러한 오차 요인을 분석하여 오차 모델 및 오차의 민감성에 대해 연구하였다.

정확한 고도 정보는 특히 저고도 비행을 하는 무인기에서 안전한 비행을 위하여 매우 중요하다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 고도의 종류에는 기압 고도(Pressure Altitude)와 해발 고도(True Altitude) 등이 있으며 기압 고도는 고도에 따른 기압 분포 특성을 이용하여 고도를 산출하는 방법이다. 기압 고도는 기준면을 설정하는 방법에 따라 여러 설정이 있는데 이중 QNH 설정을 사용하면 기준면을 해수면에 맞추어 해발 고도와 동일한 기압 고도를 표시할 수 있으며 비행 지역의 해수면이나 임의의 고도에서의 기압과 기온을 기압 고도의 기준값으로 사용하는 것이다.⁴ QFE는 절대 고도를 산출하도록 기압고도계를 설정하는 방법이다. 항공기 이착륙에 사용되는 방식으로 통상적으로 활주로를 기준면으로 고도를 0으로 설정한다. QNH와 QFE 설정은 제공되는 고도

정보에 따라 결정된다. QNH는 진고도 정보를 필요로하며 해발 고도나 GPS 고도 등이 이에 해당한다. QFE는 절대 고도가 제공되며 기상 측정 위치나 혹은 특정 지점의 고도를 기준으로 하거나 전파고도계로 측정된 고도를 사용할 수 있다.

QNH나 QFE 설정을 위해서는 비행 영역에서의 기상 정보가 제공되어야 하는데 일반적으로 지상에 위치한 기상 측정 장치나 시설에서 측정된 자료를 이용한다. 그러므로 무인기의 비행 영역이나 운용 영역은 이러한 시설이 위치한 곳으로 한정되거나 지원 시설 혹은 장비가 기상 정보를 제공할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 GPS 고도를 이용하여 QNH 설정의 기준값 정보를 외부에 의존하지 않고 비행 중 비행체 자체의 항법 정보만을 이용하여 산출하는 방법을 제시하고자 한다. 비행 중 자체 항법 정보만을 이용하여 기압 고도를 설정하면 외부의 정보를 받을 필요가 없으므로 지상 지원 시설을 간소화할 수 있고 또 외부의 정보를 받을 수 없는 영역으로 비행할 수 있어 비행 영역을 확장할 수 있을 것으로 기대된다. 두 가지 형태의 기법이 제시되며 실제 비행 시험에서 측정된 자료의 후처리를 통하여 가용성을 분석하였다.

II. 본론

2.1 기압 고도

수정 표준 대기 모델은 대류권으로 알려진 약 고도 11km까지 적용할 수 있는 압력과 고도의 근사관계로 표준 대기 상태 대신에 특정 시간과 지역의 대기 상태를 사용할 수 있다.

$$H_{BA} = H_{Ref} + \frac{T_{Ref}}{\beta} \left[\left(\frac{p}{p_{Ref}} \right)^{\frac{-R\beta}{g}} - 1 \right] \quad (1)$$

H_{Ref} : 기준 고도

p_{Ref}, T_{Ref} : 기준 고도에서 대기압과 온도

β : 기온 감률(

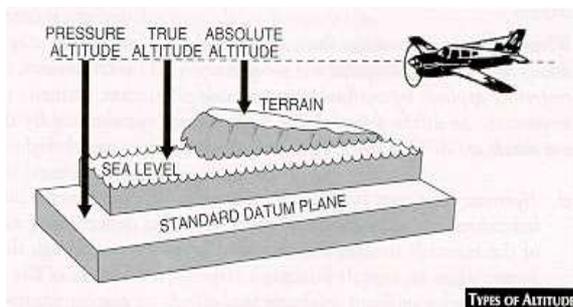


Fig. 1. Types of Altitude

2.2 자체 정보를 이용한 기준값 설정

외부 정보에 의존하지 않고 비행체 자체에서 제공되는 정보만을 이용하여 기압 고도계를 설정하는 방법으로 본 연구에서는 두 가지를 제안하고자 한다. 비행체 자체에서 제공되는 정보란 비행체에 탑재된 장비로부터 측정된 자료를 의미한다. 각 설정 방법은 기준값을 계산하는 수학적 방법을 달리하며 그에 따라 요구되는 비행 특성도 다르다. 또한 계산에 요구되는 정보 종류에서도 차이가 있다.

2.2.1 평균 방법

기압 고도계 설정에 요구되는 기준값은 세 가지로 고도와 압력, 온도이다. 일반적인 기압 고도계 설정 방법에서 외부 지원 시설로부터 제공되는 이 기준값들의 정보를 동일하게 자체 장비로 획득하는 것이 첫 번째 방법이다. 즉 일정 시간 동안 측정된 고도와 압력, 온도 정보를 시간 평균하여 그 평균값들을 기압 고도계 설정에 사용한다.

$$H_{Ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2)$$

$$p_{Ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i$$

$$T_{Ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$

측정된 고도의 종류 및 특성에 따라 기압 고도의 성격이 결정된다. 입력되는 고도는 관성 장치나 GPS로부터 전달되는 위치 정보로부터 취득할 수 있으며 진고도 혹은 해발 고도 정보이다. 혹은 전파 고도계를 사용하는 경우 절대 고도 정보를 이용하므로 QNH 대신 QFE 설정을 수행하게 된다.

시간 평균을 하기 위하여 측정하는 동안 되도록 동일한 대기와 비행 조건을 유지하고 있어야 한다. 첫 번째는 Fig. 2에 보는 바와 같이 고도를 일정하게 유지하는 비행을 하여야 하고 두 번째로 정압의 오차를 작게 위하여 비행 속도와 자세의 변동을 최소화하고 세 번째로 측정 동안 공간 이동에 따른 오차를 줄이기 위하여 측정 시간을 최소화한다. 전파 고도계를 이용하는 경우 전파 고도를 일정하게 유지하는 것만이 아니라 지형의 높낮이 변화가 적어 평탄한 곳을 선택해야 한다.

2.2.2 회귀 방법

기압 고도의 기준값 산출은 측정된 고도를 식

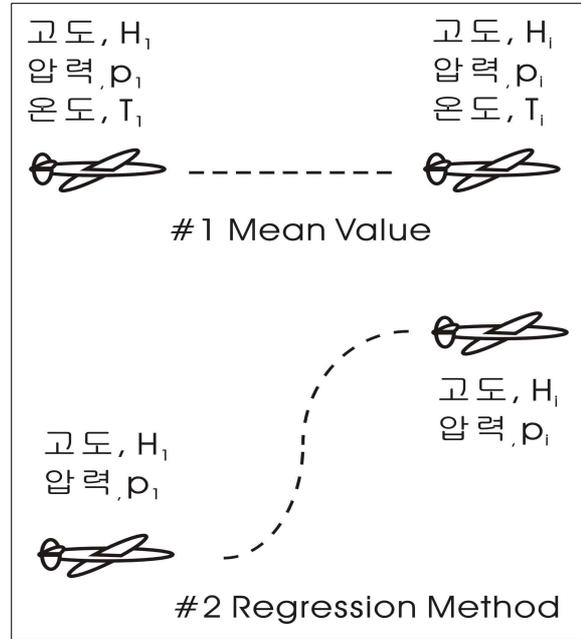


Fig. 2. Schemes of Baroaltimeter Setting

(1)을 회귀 모델로 설정하여 오차를 최소화하는 계수를 구하는 것으로 간주할 수 있다.

$$\min \left(\sum_{i=1}^N \| H_i - H_{BA_i} \| \right) \rightarrow \{ H_{Ref}^*, p_{Ref}^*, T_{Ref}^* \} \quad (3)$$

이를 위해 일반적으로 널리 사용하는 방법으로 오차의 제곱 합을 목적함수로 하는 최소자승법이 있다. 다음과 같이 목적함수, I 를 정의하고 최소값이 되는 미분항이 0이 되는 조건을 산출하면 된다.

$$I = \sum_{i=1}^N (H_i - H_{BA_i})^2 \quad (4)$$

$$= \sum_{i=1}^N \left[H_i - H_{Ref} - \frac{T_{Ref}}{\beta} \left\{ \left(\frac{p_i}{p_{Ref}} \right)^{-\frac{\beta R}{g}} - 1 \right\} \right]^2$$

$$\frac{\partial I}{\partial H_{Ref}} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial p_{Ref}} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial T_{Ref}} = 0 \quad (5)$$

회귀 방법을 적용하기 위해서는 압력에 따른 고도의 변화 특성이 잘 나타나도록 Fig. 2에서와 같이 측정 동안 비행 고도의 변화가 요구된다. 고도를 일정하게 유지하는 것이 유리한 평균 방법과는 상이한 비행 특성이 필요하다.

2.3 회귀 방법의 기준값 산출

2.3.1 최소 자승법

최소 자승법을 이용한 회귀 방법의 기준값 산

출은 식(5)의 방정식의 해를 구하는 것으로 구현된다. 식(5)는 각 기준값에 대한 비선형 연립 방정식이며 다음과 같다.

$$\frac{\partial I}{\partial H_{Ref}} = 0 : H_{Ref} + \frac{T_{Ref}}{\beta}(\bar{p}-1) = \bar{H} \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial p_{Ref}} = 0 : \bar{p}H_{Ref} - \bar{H}\bar{p} + (\bar{p}^2 - \bar{p})\frac{T_{Ref}}{\beta} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial I}{\partial T_{Ref}} = 0 : (\bar{p}-1)H_{Ref} - \bar{H}\bar{p} + (\bar{p}^2 - 2\bar{p} + 1)\frac{T_{Ref}}{\beta} = -\bar{H} \quad (8)$$

\bar{H} , \bar{p} 등은 입력 자료의 평균을 나타내며 위에 정의된 바와 같다. 압력은 편의상 기준값으로 나눈 값에 대한 평균으로 나타내었다.

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i}{p_{Ref}} \right)^{-\frac{\beta R}{g}} \\ &= \frac{(p_{Ref})^{\frac{\beta R}{g}}}{N} \sum_{i=1}^N (p_i)^{-\frac{\beta R}{g}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\bar{H}\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[H_i \left(\frac{p_i}{p_{Ref}} \right)^{-\frac{\beta R}{g}} \right] \quad (11)$$

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i}{p_{Ref}} \right)^{-2\frac{\beta R}{g}} \quad (12)$$

세 가지 기준값을 산출되기 위해서는 식 (6)과 (7), (8)이 서로 독립이어야하지만 이 조건을 만족하지 않는다. 예를 들면 {식(6)+식(8)=식(7)}의 관계가 성립하여 독립적인 식이 아니다. 이런 경우 기준값 산출에 필요한 충분한 방정식이 확보되지 않아 이 방법을 이용한 기준값 설정은 가능하지 않다.

2.3.2 선형 모델의 최소 자승법

식(4)와 (5)을 이용한 최소 자승법은 세 기준값 산출을 위한 서로 독립적인 세 식을 유도하지 못하였다. 이 문제를 분석하고 해결하기 위하여 식 (1)의 기압 고도를 선형 시스템 형태로 변형하고 최소 자승법을 적용하면 다음과 같다.

$$\tilde{Y} = \tilde{X}\tilde{C} \quad (13)$$

$$\tilde{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T, y_i = H_{BA}$$

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_N \end{bmatrix}^T, x_i = (p_i)^{-\frac{\beta R}{g}}$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} H_{Ref} - \frac{T_{Ref}}{\beta} \\ \frac{T_{Ref}}{\beta} (p_{Ref})^{\frac{\beta R}{g}} \end{bmatrix}$$

압력은 입력 변수로 표시되고 기압 고도는 그에 따른 응답으로 출력 변수가 된다. 식(3)에서 고도 차이의 최소화는 다음과 같은 목적 함수, I 를 정의하고 최소 자승법을 적용하여 구현할 수 있으며 이는 식(4)와 동일하다.

$$\begin{aligned} I(\tilde{C}) &= \frac{1}{2} \tilde{e}^T \tilde{e} = \frac{1}{2} [\tilde{H} - \tilde{Y}]^T [\tilde{H} - \tilde{Y}] \\ &= \frac{1}{2} [\tilde{H} - \tilde{X}\tilde{C}]^T [\tilde{H} - \tilde{X}\tilde{C}] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\tilde{H} = [H_1, H_2, \dots, H_N]^T$$

식(14)에 최소 자승법을 적용하면 다음과 같이 최적화된 계수를 구할 수 있다.

$$\frac{dI(\tilde{C}^*)}{d\tilde{C}} = 0, \tilde{C}^* = (\tilde{X}^T \tilde{X})^{-1} \tilde{X}^T \tilde{H} \quad (15)$$

식(13)에서 보는 바와 같이 입력 변수가 압력 하나만이기 때문에 선형 모델의 차수는 1이다. 고도는 출력 변수이므로 차수 계산에서 제외된다. 그러므로 이 선형 모델에 적용한 최소 자승법을 통해 얻을 수 있는 계수는 2개이고 최적화된 계수는 세 기준값의 조합으로 이루어져 있다. 그러므로 앞서의 최소 자승법을 통해 서로 독립인 세 개의 식을 얻지 못한 이유가 방법상의 문제가 아니라 기압 고도 모델의 차수가 충분하지 않은데 있었던 것이다. 즉 구하고자하는 변수의 개수보다 식의 개수가 적은 경우가 된다.

그러므로 최소 자승법을 이용한 회귀 방법에서는 식(3)의 최적화 조건을 만족하는 무수히 많은 기준값 조합을 만들어 낼 수 있다. 여기에 특수한 조건이나 독립적인 식을 추가하면 하나의 기준값 조합을 선택할 수 있다.

2.3.3 회귀 방법의 기준값 설정

식(6), (7), (8) 또는 식(15)이외에 추가할 조건이나 식은 여러 가지 방법을 이용하여 선정할 수 있겠으나 본 논문에서는 압력 기준값을 설정하는 식을 추가하는 방법을 제안한다. 즉 처음에 압력 기준값을 임의로 설정하고 나머지 두 개의 고도

와 온도 기준값을 최소 자승법을 이용하여 계산한다. 압력 기준값을 설정하는 방법도 여러 가지가 있을 수 있는데 본 논문에서는 대표적인 세 가지에 대해 연구하였다.

- ① 표준 대기 상태의 압력 : $p_{Ref}^* = 1atm$
- ② 초기 시점에 측정된 압력 : $p_{Ref}^* = p_1$
- ③ 평균압력 : $p_{Ref}^* = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (p_i)^K \right]^{\frac{1}{K}}, K=1$
- ④ 평균압력 : $p_{Ref}^* = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (p_i)^K \right]^{\frac{1}{K}}, K=-\frac{\beta R}{g}$

압력 기준값으로 네 가지 중 하나를 선택할 수 있는데 평균의 경우 K 지수로 일반화된 형태로서 평균 방법과 동일하게 $K=1$ 이나 기압 고도 모델을 고려하여 $K=-\frac{\beta R}{g}$ 를 사용할 수 있다. 압력 기준값을 미리 설정하였다고 하면 고도와 온도 기준값은 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{bmatrix} H_{REF}^* \\ T_{REF}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{x^2 - \bar{x}^2} \begin{bmatrix} \bar{x}^2 \bar{H} - \bar{x} \overline{xH} + (-\bar{x} \bar{H} + \overline{xH}) (p_{REF}^*)^{-\frac{R\beta}{g}} \\ (-\bar{x} \bar{H} + \overline{xH}) \beta (p_{REF}^*)^{-\frac{R\beta}{g}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i)^{-\frac{R\beta}{g}}$$

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i = \bar{H}$$

$$\overline{xH} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i H_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(p_i)^{-\frac{R\beta}{g}} \cdot H_i \right]$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i)^{-2\frac{R\beta}{g}}$$

압력과 온도의 입력을 이용한 평균 방법과 달리 회귀 방법은 온도 입력이 필요없다. 그러므로 필요한 자료가 고도와 압력, 두 가지뿐이다.

2.4 기준값 설정 방법의 적용

2.4.1 평균 방법

평균값 방법을 실제 비행에 측정된 진고도와 압력, 온도 정보에 적용하여 기준값을 설정하고 이 기준값을 사용한 기압 고도와 진고도를 비교

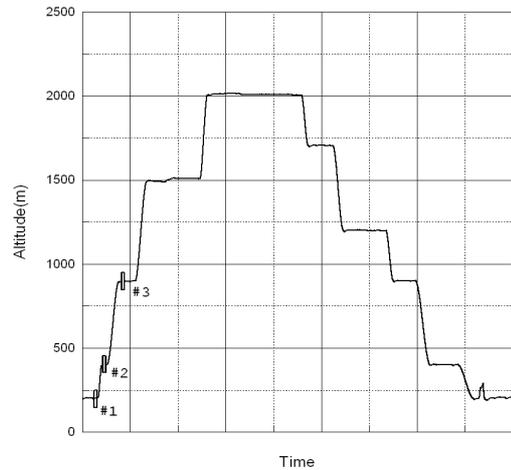


Fig. 3. Altitude Profile and Barometer Setting Points(Average)

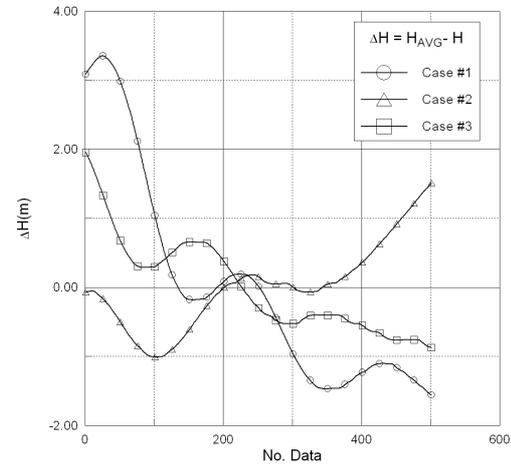


Fig. 4. Altitude Input in Average Method

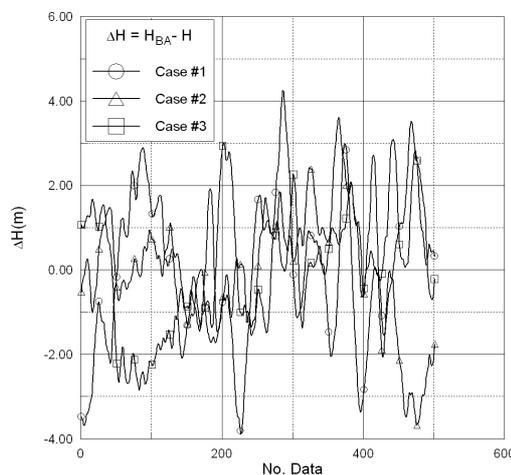


Fig. 5. Pressure Altitude Error during Barometer Setting Period(Avg.)

Tabel 1. Barometer Setting (Average Method)

No.	Barometer Setting						Flight		
	GPS Altitude		References			$\Delta H = H_{BA} - H$		$\Delta H = H_{BA} - H$	
	Avg.(m)	S.D.(m)	$H_{Ref}(m)$	$p_{Ref}(hPa)$	$T_{Ref}(^{\circ}C)$	$\mu(m)$	$\sigma(m)$	$\mu(m)$	$\sigma(m)$
1	202	1.50	202	982	5.44	0.00	1.75	-3.29	8.44
2	404	0.61	404	958	4.18	0.00	1.47	-4.13	8.36
3	899	0.67	899	902	0.83	0.00	1.47	-3.33	8.56

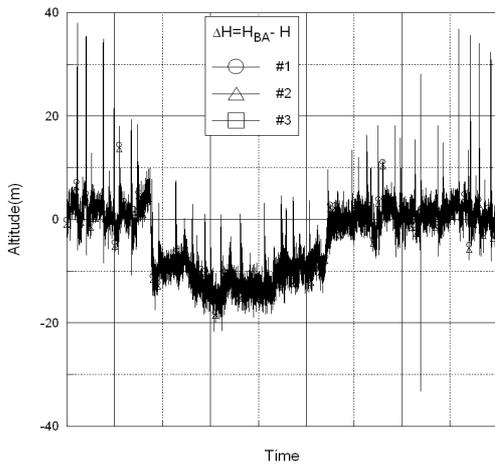


Fig. 6. Barometer Error(Average Method)

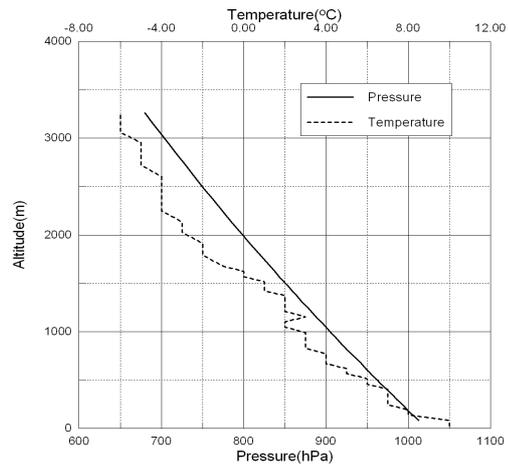


Fig. 7. Atmospheric Pressure & Temperature Data from GPS Zonde

하여 설정 방법의 가용성과 정확성을 검토하고자 한다. 사용한 궤적은 Fig. 3과 같으며 최대 약 2km까지 상승 후 하강하는 형태로 되어있다. 비행 자료에서 GPS 고도는 DGPS 고도로 후처리 되었으며 본 연구에서는 진고도로 사용하였다.

평균 방법을 비행 초기 세 번의 수평 비행 구간에서 적용하여 각각에서 기준값을 설정하였고 표 1에 주어진 바와 같다. 세 구간에서 입력 자료의 갯수는 모두 500개로 동일하게 설정되었으나 비행 고도가 200m와 400m, 900m로 서로 다르다. 이에 따라 기준값인 평균화된 측정 고도와 압력, 온도가 다르다. 기준값이 설정된 구간에서 입력된 GPS 고도의 특성은 표 1과 Fig. 4에 주어져 있으며 평균 GPS 고도는 기압 고도의 고도 기준값으로 사용된다. 기준값 설정 구간에서 기압 고도와 진고도의 오차($\Delta H = H_{BA} - H$)는 Fig. 5와 같으며 거의 모든 오차가 $\pm 4m$ 이내이며 표 1에서와 같이 평균 0m와 2m 이내의 표준 편차를 보이고 있다.

전 비행 구간에서 기압 고도 오차의 통계적 특성을 보면 표 1에서 대략 $-3 \sim -4m$ 정도의 평균 오차와 8m 정도의 표준 오차가 발생한다.

기압 고도의 오차는 기준값의 차이에 따라 특성이 크게 다르지 않기 때문에 기준값의 설정 고도가 정확도에 크게 영향주지 않음을 알 수 있다. Fig. 6은 고도 오차를 시간에 대해 나타낸 것이며 세 경우의 기압 고도 오차가 거의 동일한 특성을 보이고 있어 기준값에 의한 차이를 알기 힘들다. 고도 1.5km 이상에서 오차가 $-15m$ 까지 급속히 증가하는데 이는 비행 자세에 따른 압력 오차와 고도에 따른 기압 분포 특성이 식(1)의 표준 대기 모델과의 차이에서 유발된 것으로 추정된다. Fig. 7은 비행 당시 고도에 따른 기압과 기온 분포이며 GPS Zonde를 이용하여 측정된 자료이다. 고도 1km에서 1.5km 사이에서 기온이 거의 일정하다. 기온이 고도가 상승함에 따라 감소하지 않는 기온의 특이층 부근에서는 급격히 증가하는 경향을 보인다.^{2,3} 이는 기온 감률의 오차에 따른 것으로 참고문헌[2]에서 이러한 대기 분포에 따른 기압고도의 정확도 감소에 관해 참조할 수 있다. 또한 순간적인 오차 증가는 비행 자세에 의한 압력 섭동과 전기적 신호의 잡음, 대기 섭동 등으로 인하여 발생하기도 한다.³

그러므로 기온 특이층 아래에서 임의의 고도에서 평균 방법에 의해 기준값을 설정하여 정확한 기압 고도의 산출이 가능하다고 판단된다.

2.4.2 회귀 방법

회귀 방법은 고도 변하는 구간에서 적용할 수 있는 것으로 Fig. 8과 같이 세 구간에서 기준값 설정 기법을 적용하였다. 평균 방법과 동일하게 비행 초기에 기준값을 설정하고 기압 고도를 산출하였다. 첫 번째는 고도가 200m에서 400m로 상승하는 구간이며 두 번째는 400m에서 900m로 변하고 세 번째는 첫 번째와 두 번째의 구간을 합친 구간이다. Fig. 9는 기준값 설정에 사용된 GPS 고도 입력 자료이며 평균 방법에서와는 달리 각 구간의 자료 개수는 다르다. 각 구간에서 설정된 기준값과 고도 오차 특성은 표 2에 주어져 있는데 제안된 4가지 압력 기준값 설정 방법에 따른 특성을 모두 볼 수 있다.

첫 번째 설정 방법은 압력 기준값을 1기압으로 고정하는 것이다. 표에서 각 구간의 첫 번째 압력 기준값은 모두 1기압인 것을 볼 수 있다.

그런데 이에 해당하는 고도 기준값은 모두 음의 값으로 해발보다 낮은 지점을 기준면으로 설정하였다. 고도 기준값이 음의 값을 갖는 것은 비정상적인 현상은 아니며 이는 연구 대상인 비행 자료가 취득된 때의 기압 분포 특성에 따른 것이다. 해수면에서의 기압이 1기압보다 낮았을 것으로 짐작된다. 두 번째의 압력 기준값은 맨 처음에 취득된 압력값을 사용하는 것이고 세 번째와 네 번째의 압력 기준값도 각각의 방법에 따라 설정되었으며 특이한 사항은 보이지 않는다. 동일한 비행 자료를 사용하여도 네 방법의 기준값은 압력 기준값이 다름에 따라 나머지 고도와 온도 기준값이 다르게 설정된다. 그러나 기준값 설정 구간에서의 기압 고도 오차 특성을 보면 압력 기준값의 설정 방법에 따른 차이가 없이 동일하다.

Figure 10에서 각 경우의 기준값 설정 구간에서의 기압 고도 오차를 볼 수 있다. 평균 방법과 유사한 오차를 보이고 있어 기준값 설정에 큰 문제점이 없다고 판단된다. 다만 세 번째의 경우 상승-순항-상승 형태의 비행으로 인한 고도와 압력의 섭동의 영향으로 약간 오차가 증가한 것으로 추정된다.

전 비행 구간에서의 기압 고도 오차를 보면

각 경우에 따른 차이를 보이고 있으며 첫 번째 경우는 오차가 거의 두 배 증가하였다. 설정 구간에 따라 고도 변화가 클수록 오차가 작아지는 것을 알 수 있다. 즉 200m 정도의 고도 변화를 갖는 첫 번째 구간 보다 500m와 700m 정도의 고도가 변하는 두 번째와 세 번째 구간의 고도 오차가 더 적다. 고도 변화가 가장 작은 첫 번째 경우 기준값 설정 구간에서의 표준 편차가 가장 작은데 전 비행 구간에서의 표준 편차는 가장 크다. 이는 전 비행 구간에서의 비행 고도 영역이 약 2km까지로 기준값 설정 구간에 비해 크기 때문에 기준값 설정 고도 영역을 벗어난 비행 영역에서 오차가 커졌기 때문이다.

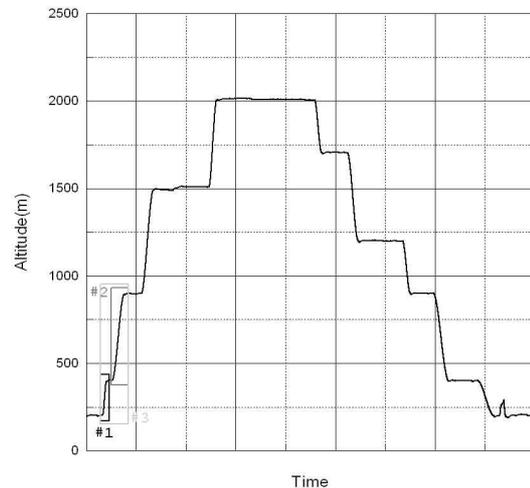


Fig. 8. Barometer Setting Points (Regression Method)

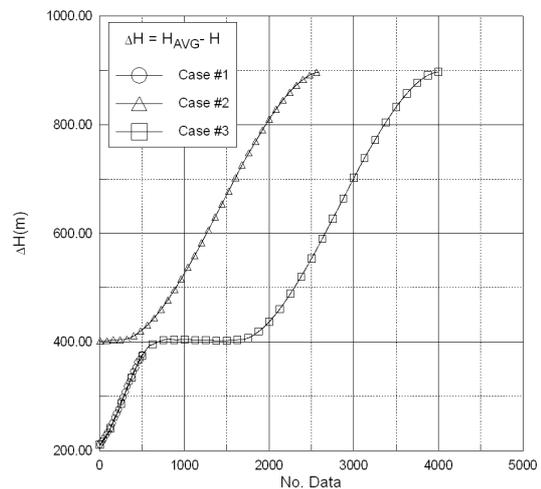


Fig. 9. Altitude Input in Regression Method

Table 2. Barometer Setting(Regression Method)

No.		Barometer Setting					Flight	
		References			$\Delta H = H_{BA} - H$		$\Delta H = H_{BA} - H$	
		$H_{Ref}(m)$	$p_{Ref}(hPa)$	$T_{Ref}(^{\circ}C)$	$\mu(m)$	$\sigma(m)$	$\mu(m)$	$\sigma(m)$
1	①	-51.0	1013	3.60	1.41	1.24	-17.6	14.8
	②	202	982	1.96	1.41	1.24	-17.6	14.8
	③	309	969	1.26	1.41	1.24	-17.6	14.8
	④	310	969	1.26	1.41	1.24	-17.6	14.8
2	①	-54.8	1013	6.92	-0.09	1.60	-6.87	8.70
	②	398	959	3.97	-0.09	1.60	-6.87	8.70
	③	660	928	2.27	-0.09	1.60	-6.87	8.70
	④	662	928	2.26	-0.09	1.60	-6.87	8.70
3	①	-55.0	1013	6.98	-0.34	2.03	-6.76	8.61
	②	202	978	5.10	-0.34	2.03	-6.76	8.61
	③	564	939	2.96	-0.34	2.03	-6.76	8.61
	④	566	939	2.94	-0.34	2.03	-6.76	8.61

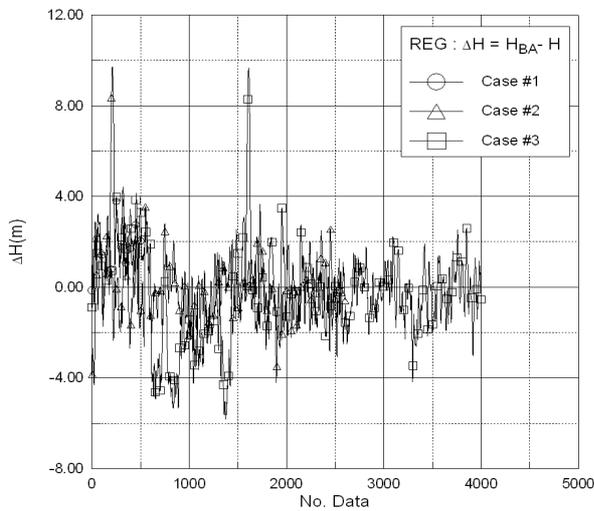


Fig. 10. Pressure Altitude Error during Barometer Setting Period(Reg.)

Figure 11은 고도 오차를 시간에 대해 도시한 것이다. 두 번째와 세 번째 경우의 기압 고도 오차 특성은 유사한데 최대 $-20m$ 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 평균 방법에 의한 기압 고도오차 특성과 유사하며 또한 고도 $1.5km$ 이상에서 오차 크게 발생함을 볼 수 있다. 반면에 첫 번째 기압 고도 오차는 최대 $-40m$ 정도로 오차의 크기도 크고 또한 $1km$ 이상의 고도에서 오차가 전반적으로 증가하였다. 앞서 기술한 바와 같이 전반적으로 기온의 특이층 부근에서 오차가 증가하였고 기준값 설정 고도 영역보다 큰 고도에서

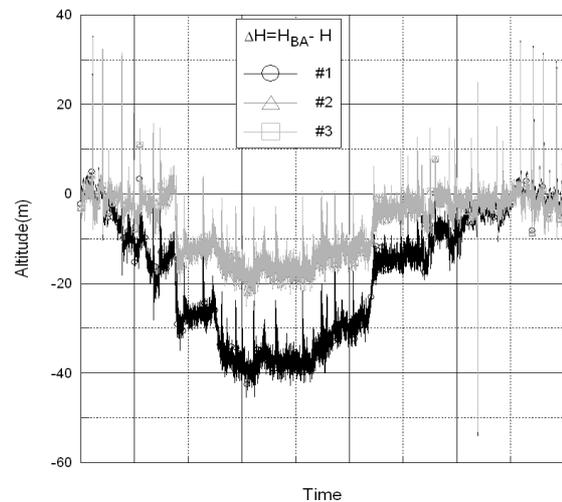


Fig. 11. Barometer Error (Regression Method)

오차가 크게 발생하였음을 확인할 수 있다.

결론적으로 회귀 방법을 적용함에 있어 기준값을 설정하는 구간에서의 고도 변화는 되도록 크게 하는 것이 기압 고도의 정확도를 증가시키며 압력 기준값의 선정 방법은 크게 영향을 없음을 알 수 있다. 평균 방법과 비교하여 온도 입력이 필요없다는 장점이 있지만 평균 방법에 비해 자료 입력 구간이 상대적으로 길게 요구되고 구간 내 비행 특성에 따라 정확도가 영향을 받는 단점이 있다.

회귀 분석에 의한 기준값 설정에 대한 정확도 분석을 좀더 세부적으로 하기 위하여 식(15)를

Table 3. Conditions of Hessian Matrix

No	1	2	3
χ	4570	2030	1860

살펴보면, 식에서 $\tilde{X}^T \tilde{X}$ 행렬은 Hessian 행렬이라고 불린다. 회귀 분석에 의한 계수 근사의 정확도는 Hessian 행렬의 특성에 따라 결정된다.⁵ 특히 행렬의 고유치의 비, $\chi = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}}$ 를 통해 정확도를 추정할 수 있는데 세 구간에서 획득한 고유치의 비는 표 3에 주어져 있다. 고유치의 비는 작을수록 정확성이 높아지는데 첫 번째 구간에서의 비는 다른 두 구간에 비하여 두 배 이상으로 크다. 그러므로 첫 번째 구간보다 큰 구간을 선택하여 회귀 분석을 적용하는 것이 보다 정확한 기준값 산출에 유리하다.

최소 고유치는 식(13)의 계수 벡터, \tilde{C} 의 두 번째 항인 온도 기준값과 관련이 있다. 온도 기준값은 식(1)의 기압 고도 모델에서 기압의 변화와 고도의 변화에 대응시키는 척도의 역할을 한다. 그러므로 회귀 분석에서 충분한 고도의 변화와 그에 상응하는 기압의 변화가 입력되어야 정확한 온도 기준값을 산출할 수 있다. 고도와 기압의 변화가 충분하지 않을 경우 온도 기준값의 정확도가 보장되지 않는다. 표 2의 경우 1과 3에서 ①과 ②를 비교해보면 압력이나 고도 기준값 하나가 동일하고 다른 기준값도 크게 차이나지 않지만 작은 차이가, 특히 온도 기준값의 차이가 표준 편차나 Fig. 11에서와 보는 바와 같은 기압 고도 오차에 영향을 준 것으로 볼 수 있다. 그러므로 회귀 분석의 방법을 적용하기 위해서는 요구되는 정확도를 보장하는 자료 입력 구간의 크기를 결정하는 방법론에 대한 연구가 필요하다.

III. 결 론

비행 중 자체 항법 정보를 이용하여 기압 고도를 설정하는 두 가지 방법을 제안하고 가용성을 연구하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 평균 방법은 항법 정보의 시간 평균인 고도와 압력, 온도의 평균값을 표준 대기 모델의 기준값으로 설정한다. 이를 위해 항법 정보를 측정하는 동안 고도를 일정하게 유지하는 비행이 필

요하다. 실제 비행 자료를 이용하여 후처리 방법으로 적용한 결과 충분한 정확도의 기압 고도 설정이 가능하였다. 또한 설정 고도에 따른 기준값 설정의 정확도 영향은 미미한 것으로 판단된다.

2) 고도를 변화시키는 비행을 통해 얻어진 항법 정보를 회귀 분석을 통해 기준값을 설정한다. 최소 자승법을 적용하여 두 개의 기준값을 산출하는 식을 유도하고 압력 기준값을 사전에 결정하는 식을 추가하였다. 실제 비행 자료를 이용한 가용성 검토 결과 기압 고도 설정에 이용할 수 있다고 판단된다. 그러나 고도 변화 범위에 따른 기압 고도 정확도의 차이가 있으므로 실제 비행에서 필요한 정확도를 얻기 위한 요구 조건 등에 대한 추가 연구가 필요하다.

3) 저고도에서 기압 고도 설정을 수행하는 경우 기압 분포의 특성에 따라 고도가 상승함에 따라 기압 고도의 오차가 증가하는 경우가 발생하였다. 기온 역전층과 같이 특이 구간이 존재하거나 시간이나 계절, 지역에 따라 다양한 기압 분포에 대해 강건성을 증가시키는 연구가 필요하다.

4) 본 연구에서 제안한 두 가지 방법은 모두 기압 고도 설정에 필요한 정보를 자체 항법 정보만으로 제공이 가능하다고 판단된다. 이런 방법을 적용하면 외부의 정보없이 기압 고도 설정이 가능하여 저고도 비행이 가능한 영역의 확장이나 지상 지원 시설의 간소화 등이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) 황익호, 나원상, "IMM 기법을 이용한 기압 고도계 오차 식별 필터," 2007년 대한전기학회 하계학술대회, 2007
- 2) Wuest, W., "Pressure and Flow Measurement", AGARD-AG-160, AGARDograph No. 160, Vol. 11, Jul., 1980
- 3) 정석영, 안창수, "기압 고도의 정밀도 향상을 위한 정압 오차 모델에 관한 연구", 한국항공우주학회 제33권 제4호, 2005, pp. 47-56
- 4) 항공장비(계기계통론), 이경준, 한국항공대 학술판부, 1973, pp15-18
- 5) Nonlinear System Identification, Nelles, O., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2001, pp36-44