JANT 한국항행학회논문지
Journal of Advanced Navigation Technology

항행 및 항법

J. Adv. Navig. Technol. 20(1): 29-36, Feb. 2016

기압 고도계를 이용한 GPS 수직오차 개선

Improving GPS Vertical Error Using Barometric Altimeter

김 라 우 · 최 광 호 · 임 준 후 · 유 원 재 · 이 형 근*
한국항공대학교 항공전자정보공학과

La-Woo Kim · Kwang-Ho Choi · Joon-Hoo Lim · Won-Jae Yoo · Hyung-Keun Lee*
Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

[요 약]

위성항법시스템 (GPS; global positioning system)은 도심지의 빌딩이나 터널, 고가도로와 같은 지형적 환경에 의해 전파 수신이 어려워지면 가시 위성의 개수가 급격히 줄어들어 위치오차가 매우 커지거나 측위가 불가능하게 된다. 특히 수직 위치오차는 GPS의 기하학적 배치에 의한 한계로 인하여 수평오차보다 약 1.5 배 이상 크며 혹독한 신호 환경에서는 수평오차보다 더욱 크게 증가하게 된다. 본 논문에서는 GPS의 수직오차 개선을 위해 GPS와 저가형 기압 고도계의 결합 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기압 고도계에 의하여 제공된 기압 고도 측정치에 해면기압과 해면온도에 의한 보상치와 지오이드고를 적용시킨 후 칼만필터에 의하여 GPS 고도와 기압 고도를 융합하는 특징을 가진다. 정적 실험과 차량 실험을 통하여 제안된 기압 고도계와 GPS의 융합 방식의 정확도를 평가하였다. 그 결과 제안된 방법이 고도 정보의 정확도를 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

[Abstract]

Accuracy of GPS (global positioning system) deteriorates dramatically or positioning is impossible in urban area occasionally since high-rise buildings and elevated roads make the reception of navigation signal very difficult so that number of visible satellites decreases. In these cases, vertical error usually becomes much larger than the horizontal error due to the intrinsic geometry of GPS satellites. To obtain more accurate and reliable height information, this paper proposes a hybrid method that combines GPS and a low-cost barometric altimeter. In the proposed method, the sea-level pressure and the sea-surface temperature are applied to the output of the altimeter. Next, the difference between the ellipsoid and the geoid is compensated. Finally, a simple Kalman filter combines the compensated barometric altitude and the GPS height. By static and car experiments, performance of the proposed method is evaluated. By the experiment results, it can be seen that the proposed method improves the altitude accuracy considerably.

Key word : GPS, Barometric altimeter, Vertical error, Kalman filter.

http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.1.29

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 13 January 2015; **Revised** 5 February 2016
Accepted (Publication) 11 February 2016 (28 February 2016)

***Corresponding Author; Hyung-Keun Lee**

Tel: +82-2-300-0131
E-mail: hyknlee@kau.ac.kr

Ⅰ. 서 론

GPS는 수평오차 10 m 내외의 정확도로 차량용 내비게이션이나 스마트폰 등에 널리 활용되고 있다. 그러나 수직오차는 수평오차의 1.5 배 이상으로 측정되기 때문에 측위 과정에서 수직위치 정보는 사용되지 않고 있다[1]. 최근에는 차량의 자율주행 기능이 주목을 받으면서 빌딩이 많은 도심지역에서의 정밀 측위의 필요성이 더욱 높아졌다. 도심지에서는 빌딩 등 지형적 환경에 의해 가시위성의 수가 급격히 줄어들어 측정 오차가 매우 커지거나 측위가 불가능해지는 경우가 종종 발생한다[2]. 따라서 가시위성의 수가 적을 때, 수직위치 정보를 측위 과정에서 사용하면 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

기압 고도계는 대표적인 고도 측정 센서로, 내장된 디지털 센서가 내부와 외부의 압력 차이를 이용하여 고도를 산출한다. 기압 고도계는 GPS와 달리 지형적 환경에 영향을 많이 받지 않으나 날씨의 영향을 많이 받는다[3]. 또한 단기간의 상대적인 고도변화 측정은 GPS보다 정확하다는 장점을 지닌다. 그러나 지오이드를 기준으로 하는 기압 고도는 해면기압이 실시간으로 변화하기 때문에 산출방법이나 보정방법에 따라서 절대적인 고도값에는 오차가 있을 수 있다.

기존의 기압 고도계의 활용에 관한 연구에서는 기압 고도를 보정해주지 않고 기압 고도 측정값의 비율을 이용하거나, 보정과정을 없애기 위하여 별도의 기준국을 설치하여 바이어스 오차를 제거하는 기법이 연구되었다[1], [3].

기압고도의 변화 비율을 칼만필터의 업데이트 계수로 사용한 기존의 연구는 고도 정보의 정확도를 크게 향상시켰다[1]. 반면, 고도의 변화가 심할 때 오차가 커질 수 있으며 특히 이전 시점의 고도가 0 이면 비율이 무한대가 되는 위험성을 내포하므로 개선이 필요하다. 기존 연구 [3]의 경우에는 기준국에서 표준대기를 기준으로 측정된 기압고도와 이미 알고 있는 기준고도를 이용하여 계산된 오차를 이동체로 전송하는 방법을 사용하였다. 이는 서로 다른 지역에서 해면기압의 차로 인해 발생하는 오차나 지오이드고의 차이로 인해 발생하는 오차에 취약하다.

본 논문에서는 기상청 정보를 활용하여 동시간의 해면기압과 온도를 사용하고 지오이드고 보정을 통하여 최종적으로 산출된 기압 고도 측정값의 변화량을 사용함으로써 오차를 최소화 하였다. 제안된 방법은 자체적으로 기압 고도를 GPS 고도로 환산하기 때문에 별도의 기준국 설치를 필요로 하지 않는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기압 고도의 산출 및 보정 방법에 대해 설명하고 3장에서는 기압 고도와 GPS 고도를 융합하는 칼만필터 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 제안된 기법이 적용된 실험과 성능평가에 대한 결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구내용에 대해서 설명한다.

Ⅱ. 기압 고도의 산출 및 보정

2-1 기압 고도계 및 기압 고도 모델

기압 고도계는 측정하는 고도에 따라 변화하는 대기의 압력과 온도를 이용하여 지오이드에 대한 고도정보를 제공하는 장비이다. 다양한 기압과 고도의 관계식이 있지만, 그 중에서 가장 널리 사용되는 모델은 다음과 같다[4].

$$H = \frac{273.15 + T_0}{\gamma} \times \left\{ \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\gamma \times \frac{R}{g}} - 1 \right\} \tag{1}$$

여기서 H는 기압 고도, T_0는 해면온도, P_0는 해면기압, P는 측정된 기압을 각각 나타낸다. 또한 γ, R, 그리고 g는 상수값으로 기온감률, 기체상수, 그리고 중력가속도를 각각 나타낸다.

2-2 기압 고도 보정

기압과 온도는 고정된 위치에서 측정하더라도 날씨의 영향을 받아 변화한다. 따라서 식 (1)에서 사용되는 해면기압과 해면온도를 상수값으로 적용하면 오차가 발생할 수 있다. 또한 기존에는 표준대기인 1013.25 hPa, 15℃가 식 (1)에 대입되어 기압과 고도의 관계식이라고 널리 알려져 있으며 이는 식 (2)와 같이 정리된다[5].

$$H = 44330 \times \left\{ 1 - \left(\frac{P}{1013.25} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right\} \tag{2}$$

식 (2)는 기압 고도의 상대적인 변화량을 계산할 때에는 큰 오차가 발생하지 않지만 절대고도를 계산할 때는 상황에 따라 매우 큰 오차가 발생할 수 있다.

[매분관측자료] 파주 99 (29m) / 2016.01.03 13:00 / 경기도 파주시 문산읍 운천리

시:분	강수	강수15	강수60	강수6H	강수12H	일강수	기온	풍향1		풍속1	풍향10		풍속10	습도	해면기압
13:00	○	0	0	0	0	0	6.9	215.4	SW	1.4	226.8	SW	1.4	77	1019.6
12:59	○	0	0	0	0	0	6.9	237.6	WSW	2.0	224.4	SW	1.4	77	1019.6
12:58	○	0	0	0	0	0	7.0	220.8	SW	1.7	219.6	SW	1.4	77	1019.6
12:57	○	0	0	0	0	0	7.0	221.8	SW	1.6	218.9	SW	1.3	77	1019.6
12:56	○	0	0	0	0	0	7.0	235.2	SW	1.5	217.3	SW	1.3	77	1019.6
12:55	○	0	0	0	0	0	7.1	242.0	WSW	1.0	215.6	SW	1.3	77	1019.6
12:54	○	0	0	0	0	0	7.1	251.1	WSW	1.2	212.8	SSW	1.3	77	1019.6
12:53	○	0	0	0	0	0	7.1	238.8	WSW	1.6	205.9	SSW	1.3	77	1019.7
12:52	○	0	0	0	0	0	7.1	213.6	SSW	1.3	199.9	SSW	1.3	78	1019.6
12:51	○	0	0	0	0	0	7.1	190.4	S	1.1	196.6	SSW	1.4	78	1019.6
12:50	○	0	0	0	0	0	7.0	190.1	S	1.4	195.4	SSW	1.5	78	1019.6
12:49	○	0	0	0	0	0	7.0	191.6	SSW	1.4	194.4	SSW	1.6	77	1019.7
12:48	○	0	0	0	0	0	7.1	213.7	SSW	1.3	193.1	SSW	1.6	77	1019.7
12:47	○	0	0	0	0	0	7.1	206.7	SSW	1.2	189.2	S	1.6	78	1019.7
12:46	○	0	0	0	0	0	7.2	219.6	SW	1.3	186.0	S	1.6	79	1019.7
12:45	○	0	0	0	0	0	7.1	214.8	SW	1.2	181.4	S	1.6	79	1019.7

그림 1. 기상청에 의해 제공되는 해면기압과 해면온도 자료의 예시[6]

Fig. 1. An example of sea-level pressure and sea-surface temperature data obtained from KMA (Korea meteorological administration)[6].

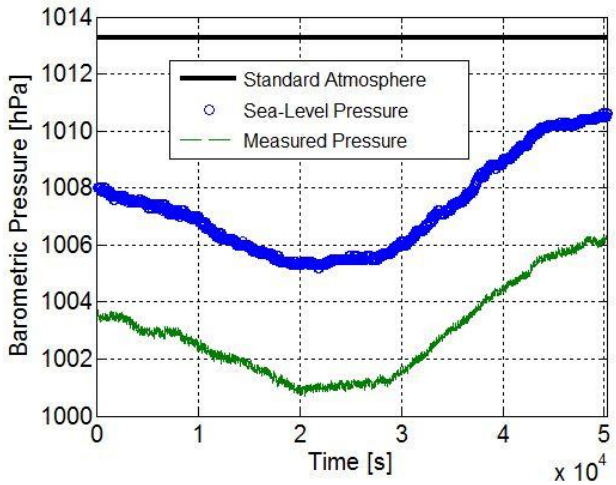

그림 2. 표준대기와 실제 해면기압의 차이
Fig. 2. Difference between standard-atmosphere pressure and real sea level pressure.

표준대기의 해면기압과 해면온도를 가정하는 기존의 방법에 의해 발생되는 오차를 방지하기 위하여 제안된 방법에서는 기상청에서 제공하는 해면기압과 해면온도를 1분 주기로 식 (1)에 의하여 보상해 주는 방식을 사용하였다. 기상청은 방재용 기상관측장비에서 측정된 해면기압과 해면온도 정보를 1분 간격으로 제공한다.

그림 1은 기상청에서 온라인으로 제공하는 지역별 상세 관측 자료를 예시한 것이다. 본 논문에서는 기상청에서 제공되는 여러 정보들 중에 기온과 해면기압에 대한 정보를 활용하였다. 기상청 정보는 현지 시간 (UTC +09:00)으로 제공되기 때문에 제안된 방법에서는 GPS 시간을 현지 시간으로 변환하는 과정을 수행하였다.

그림 2는 약 14시간 동안의 기압 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 실선은 표준대기 기압, 원으로 표시된 데이터는 기상청에서 제공하는 해면기압, 점선은 본 논문에서 사용한 기압고도계인 BMP180으로 고정된 위치에서 측정한 기압이다[5].

그래프에서 볼 수 있듯이 해면기압과 BMP180으로 측정한 기압은 측정한 장소의 고도 차이로 인하여 기압값에는 차이가 있지만 같은 동향을 보임을 확인할 수 있다.

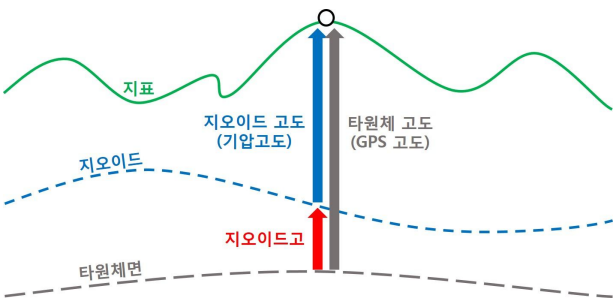

그림 3. 지오이드와 타원체면
Fig. 3. Geoid and ellipsoid.

또한 기상청에서 제공하는 실제 해면기압은 표준대기의 해면기압과 차이가 큰 것을 확인할 수 있으며, 따라서 표준대기를 기준으로 한 식 (2)로 산출된 기압 고도를 실제 기압 고도라고 판단하기 어렵다.

기상청 자료를 활용하여 기압 고도를 산출하였더라도 GPS 고도와는 차이가 있을 수 있다. 그 이유는 기압 고도는 지오이드 기준 고도이고 GPS 고도는 타원체면 기준 고도이기 때문이다. 지오이드란 평균 해수면을 이용하여 지구의 모양을 나타낸 것이다. 실제 지표면을 기반으로 지구의 모양을 나타내는 것은 매우 어렵기 때문에 실제 지표면보다는 단순하면서도 타원체보다는 실제에 가깝게 지구의 모양을 나타낸 것이다. 타원체 모형은 지구가 완전한 구가 아닌 적도반지름이 극반지름보다 약간 긴 일그러진 타원체인 것을 기반으로 지구를 완전한 타원체로 가정하여 모델링 한 것이다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 지오이드와 타원체면 사이의 거리를 지오이드고 (geoid height)라 한다. 따라서 사용자가 실제 해면기압과 해면온도로 산출한 기압 고도를 GPS 고도와 등가한 타원체 고도로 환산하려면 기압 고도에 지오이드고를 더해 주어야 한다.

본 논문에서 제안된 방법은 기압 고도계에서 측정된 기압을 기상청에서 제공하는 실제 해면기압과 해면온도로 보상된 식에 의해 산출된 기압 고도에 대하여 지오이드고를 적용함으로써 GPS 고도와 등가한 타원체 고도로 변환하는 방식을 사용한다.

한반도의 지오이드고 자료는 국토지리정보원에서 제공하는 수직기준 변환 서비스 중 지오이드 서비스를 통해 얻을 수 있다. 그림 4는 국토지리정보원에서 제공하는 지오이드고 정보를 예시한 것이다. 본 논문에서는 최신 국가지오이드 모델인 KNGeoid14를 사용하였으며 이는 2014년에 구축되었다. 기존 KNGeoid13과 달리 육상 부분만을 대상으로 한 것이 아니라 섬 및 해양을 포함하여 한반도 전 지역의 지오이드고를 계산할 수 있다[7].

파일(F) 편집(E) 서식(O) 보기(V) 도움말(H)

ID	위도	경도	지오이드고
01	37.66212858	126.72964129	22.829
02	37.66207883	126.72980692	22.829
03	37.66203065	126.72997191	22.830
04	37.66198359	126.73013834	22.830
05	37.66193629	126.73030783	22.831
06	37.66188956	126.73048036	22.831
07	37.66184300	126.73065501	22.831
08	37.66179342	126.73082928	22.832
09	37.66173909	126.73100166	22.832
10	37.66167975	126.73117221	22.833
11	37.66161554	126.73134138	22.833
12	37.66154841	126.73150972	22.834
13	37.66147893	126.73167735	22.834
14	37.66140802	126.73184546	22.834
15	37.66133437	126.73201235	22.835

그림 4. 국토지리정보원에 의해 제공되는 지오이드고 자료의 예시[7]
Fig. 4. An example of geoid height data obtained from NGII (national geographic information institute)[7].

Ⅲ. 기압 고도와 GPS 고도의 융합

기압 고도와 GPS 고도를 융합하는 데에는 칼만필터를 이용한 알고리즘이 활용되었다. 칼만필터는 잡음이 포함되어 있는 시스템의 상태를 추적하는 재귀 필터이다.

알고리즘은 크게 예측과 추정 두 단계로 나눌 수 있다. 예측 단계에서는 바로 이전 시점의 추정값과 추정값의 오차 공분산, 시스템 모델을 기반으로 현재 시점의 예측값과 예측값의 오차 공분산을 계산하며, 추정 단계에서는 예측 단계에서 계산된 값과 측정값을 토대로 현재 시점의 상태를 추정한다.

본 논문에서는 기압 고도계를 이용하여 GPS의 수직오차를 개선한다. 이를 위해 예측 단계에서 기압 고도를 이용하며, 이를 토대로 추정 단계에서 칼만이득을 가중치로 사용하여 GPS 고도와 예측 단계에서 얻은 값으로 최종 고도값을 추정한다. 자세한 내용은 각 절에서 설명하기로 한다.

칼만필터의 전체적인 순서도는 그림 5와 같으며, 기존 칼만필터 알고리즘과 차별성을 두고 단점을 보완하기 위하여 추정 단계로 넘어가기 전 과정에 측정값 (GPS 고도)과 고도 예측값의 차이를 계산하는 식을 추가하였다. 이 값이 임계값을 초과할 시에는 GPS 정보가 불확실하다고 판단하여 측정값의 영향을 받는 추정 단계를 거치지 않고 고도 추정값은 고도 예측값으로 대체하고, 오차 공분산은 오차 공분산 예측값으로 대체하도록 설계하였다. 이 과정을 통하여 지형적 환경 등의 요인에 의해 가시위성의 수가 급격히 적어지거나 GPS 신호 수신을 하지 못하여 GPS 수직오차가 급증해도 정확한 고도값 계산을 가능하도록 하였다.

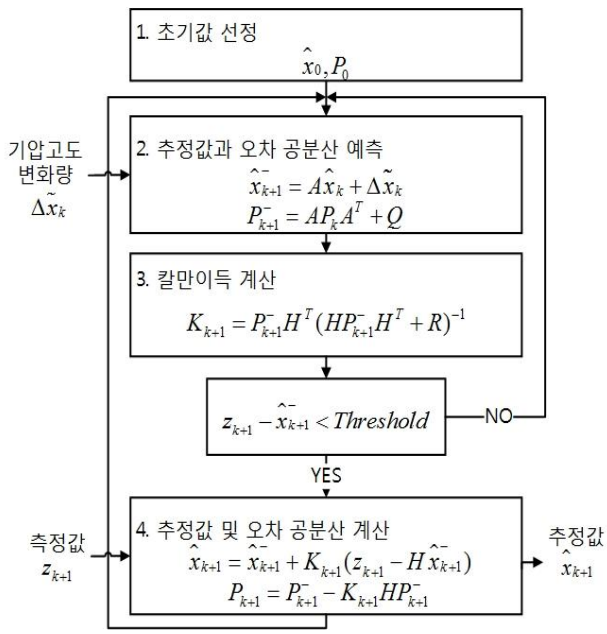

그림 5. 칼만필터 알고리즘
Fig. 5. Kalman filter algorithm.

3-1 칼만필터의 예측 단계

예측 단계에서 사용되는 계산식은 다음과 같다.

$$A = 1 \tag{3}$$

$$\hat{x}_{k+1}^- = A\hat{x}_k + \Delta\tilde{x}_k \tag{4}$$

$$P_{k+1}^- = AP_kA^T + Q \tag{5}$$

여기서 시스템 모델의 업데이트 계수 A는 샘플링 주기인 1초 동안 큰 고도 변화가 없다고 가정하여 1로 고정했다. 이를 보완하기 위해 기압 고도의 변화량을 추가 변수 $\Delta\tilde{x}_k$로 설정하였다.

식 (4)는 고도 예측값의 계산식이다. 이 과정에서 상대적인 고도변화 측정은 해면기압과 해면온도를 고려한 기압 고도가 GPS와 비교하여 보다 안정적으로 제공될 수 있다는 점을 이용하여 고도 예측값 $\hat{x}_k^-$는 이전 시점의 고도 추정값 $\hat{x}_k$에 기압 고도의 변화량 $\Delta\tilde{x}_k$을 더하여 계산된다.

식 (5)는 오차 공분산 예측값의 계산식이다. 오차 공분산 예측값 P_k^-는 이전 시점의 오차 공분산 추정값 P_k와 Q를 통해 계산된다. 여기서 Q는 기압 고도계 측정값의 공분산이다.

3-2 칼만이득

변수 K_k는 칼만이득 (Kalman gain)이라고 불리는 변수이다. 계산식은 식 (6)과 같다.

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (HP_{k+1}^- H^T + R)^{-1} \tag{6}$$

칼만이득은 오차 공분산 예측값 P_k^-, 시스템 모델 변수 H와 R을 통해 계산된다. H는 상태변수 x_k, 즉 필터에서 구하고자 하는 추정값과 측정값의 관계를 나타낸다. 이론적으로 고도 추정값과 GPS 고도는 일치하기 때문에 $H=1$로 설정하였다. R은 측정값인 GPS 고도의 공분산이다.

칼만이득은 추정값을 계산할 때, 측정값의 가중치 역할을 한다. 따라서 칼만이득이 크면 측정값의 영향을 많이 받는다. 칼만필터의 가장 큰 특징 중 하나는 칼만이득이 고정되어 있지 않고, 매번 새로 계산된다는 것이다. 즉 상황에 따라 추정값 계산식의 가중치가 계속 업데이트 된다.

3-3 칼만필터의 추정 단계

고도 측정값과 고도 예측값의 차이가 임계값을 넘지 않으면 추정 단계로 넘어오게 된다. 추정 단계에서 사용되는 계산식은 다음과 같다.

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^{-} + K_{k+1}(z_{k+1} - H\hat{x}_{k+1}^{-}) \quad (7)$$

$$P_{k+1} = P_{k+1}^{-} - K_{k+1}HP_{k+1}^{-} \quad (8)$$

식 (7)은 고도 추정값의 계산식이다. 3-2절에서 언급했듯이 고도 추정값은 고도 예측값과 고도 측정값 z_k에 칼만이득을 가중치로 적용하여 계산된다.

식 (8)은 오차 공분산의 계산식이다. 오차 공분산은 추정값의 오차를 나타내는 척도로 사용된다. 즉, 오차 공분산이 크면 추정 오차도 크다.

Ⅳ. 실험과 성능평가

제안된 방법의 정확도를 평가하기 위하여 실내 정적 실험과 차량 실험이 수행되었다. 실내 정적 실험은 제안된 기압 고도의 산출 및 보정방법의 적용 가능성을 확인하고 기압 고도계의 오차 특성분석을 위해 수행되었으며 차량 실험은 제안된 칼만필터 융합 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 수행되었다.

실험장비는 BOSCH사의 저가형 기압 고도계 BMP180, Ublox사의 저가형 L1 단일 주파수 GPS 수신기 AEK-4T, 저가형 임베디드 보드 Beaglebone Black이 사용되었다[5]. 실험장비들의 인터페이스는 그림 6에 나타나 있다. GPS 수신기는 임베디드 보드와 USB로 연결되어 위치 정보와 시각 정보를 제공한다. 기압 고도계는 임베디드 보드와 I2C 인터페이스로 연결되어 온도와 기압 정보를 제공한다.

실내 정적 실험의 기준값 측정을 위한 장비로는 Trimble사의 choke ring 안테나와 Net R5 수신기가 사용되었으며 차량 실험의 기준값 측정을 위한 장비로는 Novatel사의 GPS-703-GGG 안테나와 ProPak6 수신기가 사용되었다.

4-1 실내 정적 실험

실내 정적 실험은 한국항공대학교 연구동에서 10시간 동안 수행되었으며 실험 결과는 표 1과 그림 7 – 그림 8에 나타내었다.

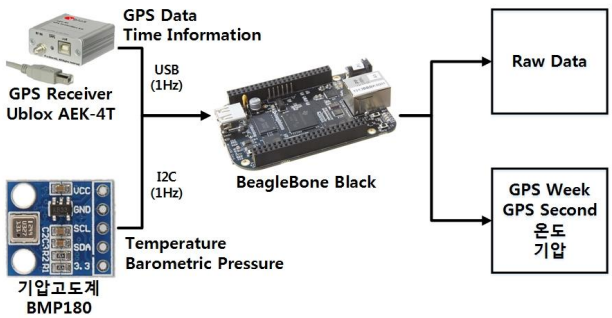

그림 6. 실험장비 인터페이스
Fig. 6. Interface of equipments.

표 1. 실내 정적 실험 결과
Table 1. Results of static test.

	Reference	Uncompensated	Compensated
Mean	63.48 m	-113.82 m	63.24 m
RMSE	-	177.32 m	1.17 m
Error mean	-	-177.30 m	-0.24 m
Standard deviation	-	2.18	1.15

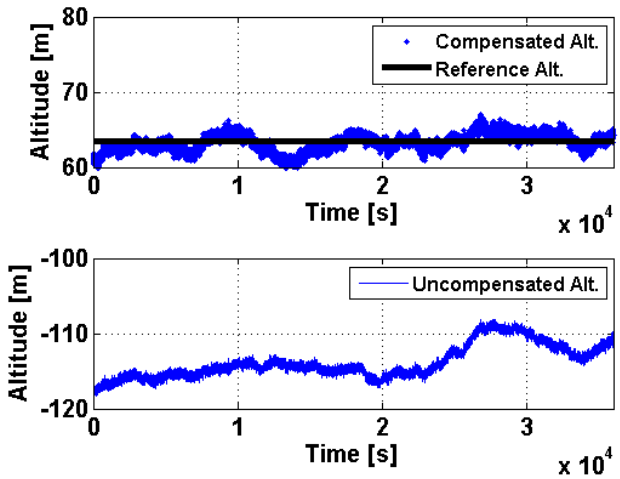

그림 7. 실내 정적 실험 결과
Fig. 7. Results of static test.

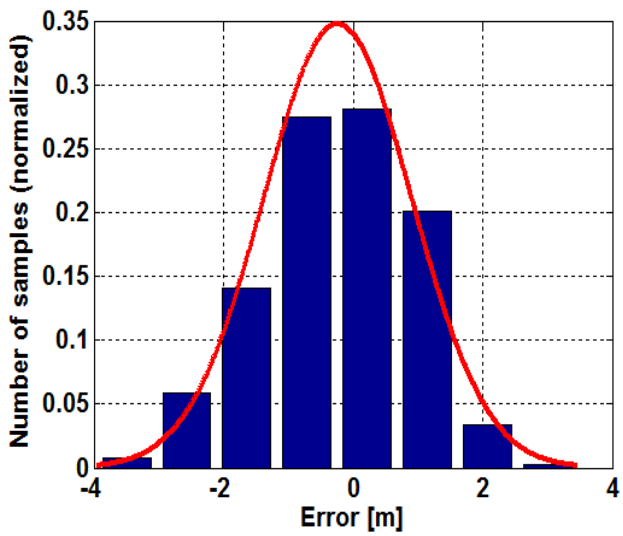

그림 8. 보정된 기압 고도의 오차 특성
Fig. 8. Error characteristics of compensated barometric altitude.

표 1은 실험 결과를 수치로 나타낸 표이다. 보정된 기압 고도의 평균은 63.24 m로 기준고도보다 0.24 m 낮게 측정되었다. RMSE 값은 보정 전이 117.32 m, 보정 후가 1.17 m로 약 99% 향

상되었음을 확인할 수 있다.

그림 7은 고도 그래프이며, 보정 전과 후의 값의 차이가 커서 두 개로 나누어 나타내었다. 그림 7에서 위의 그래프는 기준고도와 보정한 기압 고도를 나타내었고 아래의 그래프는 보정하지 않은 기압 고도 (표준대기 기준)를 나타내었다.

그림 8은 보정된 기압 고도의 오차 특성을 나타낸 그래프이다. 보정된 기압 고도의 오차 특성은 평균 −0.24, 표준편차 1.15인 가우시안 분포를 보였다.

4-2 차량 실험

차량 실험은 위성 가시성이 확보되며 고도변화가 잦은 제2자유로 법곳 IC-현천 IC 사이의 약 15 km 구간에서 수행하였다.

차량 실험 동안에 주행속도는 관측 정확도를 위해 시속 60 km 정도를 유지하였다. 실험 경로는 그림 9에 나타내었다. 사각형으로 표시한 부분은 GPS 신호 수신이 되지 않은 구간이다. 실험 결과는 표 2와 그림 10 − 그림 13에 나타내었다.

표 2는 차량 실험의 결과이다. 표에서 각 항목은 단독 GPS 고도와 융합 고도를 기준고도와 비교하여 오차 제곱의 평균, 오차 평균, 오차의 표준편차를 수치로 나타낸 것이다. 기준고도는 고성능의 GPS 수신기와 정밀 GPS 소프트웨어 패키지인 GAFAS[8]를 활용하여 RTK (real-time kinematic) 기법으로 산출되었으며, 기준국은 한국항공대학교 연구동 옥상에 설치된 기준국을 활용하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 융합 고도는 단독 GPS 고도와 비교하여 RMSE 값이 10.72 m에서 1.04 m로 약 90% 향상되었다.

그림 10은 기압 고도와 단독 GPS 고도, 그리고 융합 고도를 비교한 그래프이다. 그림에서 점선은 기압 고도, 실선은 융합 고도 그리고 다이아몬드 모양으로 표시된 것은 단독 GPS 고도를 각각 나타낸다. 고가도로 밑을 지나거나 주변의 장애물에 의해 일시적으로 GPS 신호 수신이 불가능하여 그림에서 확인할 수 있듯이, 9개 구간의 고도를 0으로 표시하였다. 이에 반해 융합 고도는 전 구간에서 고도정보를 제공함을 확인할 수 있다. 또한 융합 고도의 평균값은 GPS 고도를 따라가며 기압 고도와의 융합을 통하여 불안정한 값을 최소화시킴을 확인할 수 있다.

그림 11은 융합 고도를 기준고도와 비교한 것이다. 융합 고도는 점으로 표시하였으며 기준고도는 실선으로 표시하였다.

그림 9. 차량 실험 경로
Fig. 9. Course of vehicle test.

그림 12는 융합 고도와 단독 GPS 고도의 오차를 나타낸 그래프이다. 융합 고도의 오차는 점으로 표시하였고 단독 GPS 고도의 오차는 별모양으로 표시하였다. 고가도로 밑을 지나 일시적으로 GPS 신호 수신이 불가능했던 9개 구간에서 단독 GPS의 고도 오차값이 크게 증가하며 융합 고도보다 전반적인 오차가 큼을 확인할 수 있다.

표 2. 차량 실험 결과
Table 2. Results of vehicle test.

	Standalone GPS	Fusion
RMSE	10.72 m	1.04 m
Error mean	-3.00 m	-0.10 m
Standard deviation	10.30	1.04

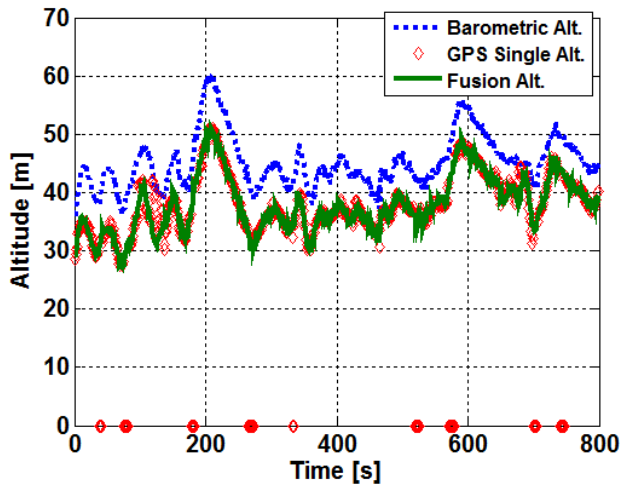

그림 10. 차량 실험 결과
Fig. 10. Results of vehicle test.

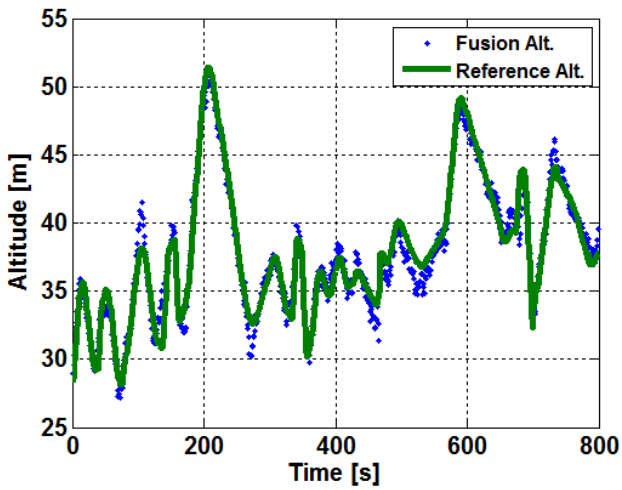

그림 11. 융합 고도와 기준고도
Fig. 11. Fusion altitude and reference altitude.

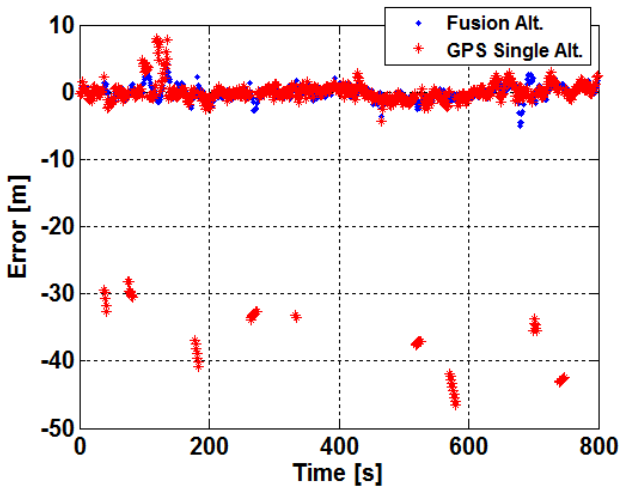

그림 12. 융합 고도와 단독 GPS 고도의 오차
Fig. 12. Error of fusion altitude and GPS single altitude.

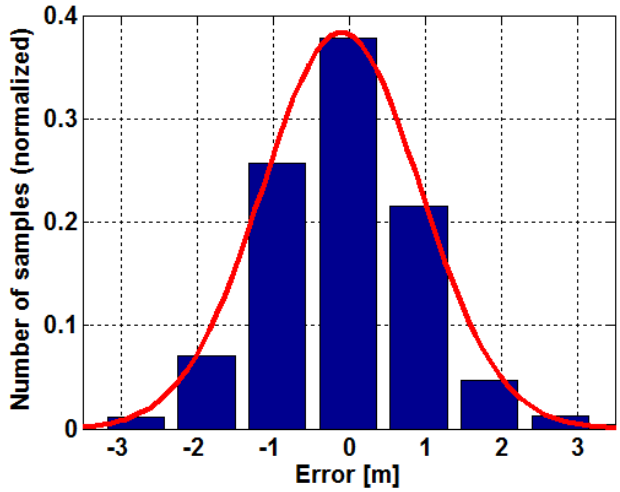

그림 13. 융합 고도의 오차 특성
Fig. 13. Error characteristics of fusion altitude.

그림 13은 융합 고도의 오차 특성을 나타낸 그래프이다. 융합 고도의 오차 특성은 평균 −0.10, 표준편차 1.04인 가우시안 분포를 보였다.

Ⅴ. 결 론

GPS는 절대적인 항법으로 오차가 누적되지 않고 가시위성의 수만 확보되면 정확한 측위가 가능한 장점이 있으나 지형적 환경에 영향을 많이 받아서 가시위성의 수가 줄어들면 오차가 급격히 커지거나 측위가 불가능한 단점이 있다. 반면에 기압 고도계는 지형적 환경에 영향이 적고 상대적인 고도 변화를 정확하게 측정하지만 날씨의 영향을 많이 받아 산출 및 보정과정에서 절대 고도와 차이가 발생하는 단점이 있다.

본 논문에서는 GPS와 기압 고도계의 장점을 융합하여 수직오차를 줄이기 위하여 기압 고도의 산출 및 보정방법을 제시하여 기압 고도를 GPS 고도로 환산하고, 칼만필터를 이용하여 기압 고도와 GPS 고도를 융합하는 알고리즘을 제안하였다.

실내 정적 실험에서는 제안된 기압 고도 산출 및 보정방법을 통하여 기압 고도를 GPS 고도로 정밀하게 환산하는 과정을 제시하였다. 이 과정에서 RMSE값이 117.32 m에서 1.17 m로 약 99% 이상 감소하였음을 확인하였다. 차량 실험에서는 2장의 기압 고도의 산출 및 보정과정을 거친 기압고도와 측정된 GPS 고도가 제안된 칼만필터 알고리즘에 의해서 효율적으로 융합됨을 확인하였다. 이 과정에서 RMSE값이 10.72 m에서 1.04 m로 약 90% 이상 감소하였음을 확인하였다. 특히 GPS 신호 수신이 불가능한 구간에서도 수직위치 정보를 제공함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부 산업기술혁신사업 (과제번호: 10050551)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다. 본 연구의 주저자는 해양수산부 해양교통전문인력양성사업 (GNSS 부분)의 지원을 받고 있습니다.

참고 문헌

[1] N. H. Kim, C. H. Park, “A barometric altitude sensor and GPS altitude system fusion by using Kalman filter,” in *Proceeding of the 36th Institute of Electronics Engineers of Korea (IEEK)*, Jeju: Korea pp. 549-551, July 2013.

[2] V. Zaliva and F. Franchetti, “Barometric and GPS altitude sensor fusion,” in *Proceeding of the 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Florence: Italy, pp. 7525-7529, May 2014.

[3] H. Yoo, S. B. Chun, C. B. Kwon, Y. J. Lee, G. I. Jee, H. S. Jun and J. M. Joo, “Altitude estimation improvement in DGPS using barometric altitude sensors,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Sciences*, Vol. 34, No. 1, pp. 89-94, Jan. 2006.

[4] K. H. Park, A Fusion of GPS and baro-altimeter for stabilizing vertical channel, M.S. dissertation, Seoul National University, Seoul, Feb. 2003.

[5] Bosch Sensortec Gmbh, BMP180 Digital pressure sensor data sheet, BOSCH Sensortec, Reutlingen, BST-BMP180-DS000-09, April 2013.

[6] Korea Meteorological Administration [Online]. Available: http://www.kma.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp

[7] National Geographic Information Institute [Online]. Available: http://ngii.go.kr

[8] Navigation & Information Systems Laboratory (NISL) [Online]. Available: http://nisl.kau.ac.kr/GAFAS.zip

김 라 우 (La-Woo Kim)
2015년 2월 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
2015년 3월~현재 : 한국항공대학교 대학원 항공전자정보공학과 석사과정
※ 관심분야 : GPS/BeiDou, 고도계, 임베디드 시스템

최 광 호 (Kwang-Ho Choi)
2010년 8월 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
2012년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2012년 9월~현재: 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과박사과정
※ 관심분야 : 항법시스템, 전리층감시, GPS/INS

임 준 후 (Joon-Hoo Lim)
2009년 8월 :한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)
2010년 3월~2011년 8월 : 한국항공우주연구원 (연구원)
2013년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2013년 9월~현재: 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과박사과정
※ 관심분야 : 복합측위 기법, 임베디드 시스템

유 원 재 (Won-Jae Yoo)
2014년 2월 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
2014년 3월~현재: 한국항공대학교 대학원 항공전자정보공학과석사과정
※ 관심분야 : SDR, 소프트웨어 GPS/GNSS 수신기

이 형 근 (Hyung Keun Lee)
1990년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
1994년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)
2002년: 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학박사)
1994년 3월~1998년 2월: 현대우주항공(주)(주임연구원)
2002년 9월~2003년 8월: SNAP, UNSW(Postdoctoral Research Fellow)
2003년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 (교수)
※ 관심분야 : 항법/측위시스템, 위치정보, ITS, LBS