

## 내장형 시스템에 적용 가능한 지오이드의 실시간 결정

# Real-time Calculation of Geoid Applicable to Embedded Systems

김현석<sup>1,2</sup> · 박찬식<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국방과학연구소

<sup>2</sup>충북대학교 제어로봇공학과

Hyun-seok Kim<sup>1</sup> · Chan-sik Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

<sup>2</sup>\*Department of Control and Robotics Engineering, Chungbuk National University, Chungcheongbuk-do, 28644, Korea

### [요 약]

수직위치 정확도를 개선하기 위해 GPS와 기압고도계의 장점을 융합하여 사용하지만, 두 센서를 융합하기 위해서는 지오이드 고도를 보상해 주어야 한다. 본 논문에서는 드론이나 자율주행 차량에 적용되는 저가의 내장형 시스템에서도 실시간으로 지오이드 고도를 계산할 수 있는 기법을 제안하였다. 기준이 되는 EGM08은 2160차의 다항식으로 결정되기 때문에 내장형 시스템에서 실시간 계산이 불가능하다. 때문에 선형 보간 기법을 도입하여 계산량을 줄이고, 정수형 지오이드 고도를 격자점으로 사용하여 저장공간을 75%절감하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 정확도를 평가하였으며, 지오이드 변화가 급격한 지역에서도 최대 오차 -1.215 m의 정확도를 갖는 것을 확인하였다.

### [Abstract]

In order to improve the vertical position accuracy, the advantages of GPS and barometric altimeter are combined and used, but in order to fuse the two sensors, the geoid altitude must be compensated. In this paper, we proposed a technique that can calculate geoid altitude in real time even in low-cost embedded systems applied to drones or autonomous vehicles. Since the reference EGM08 is determined by a polynomial of the 2160th order, real-time calculation is impossible in the embedded system. Therefore, by introducing a linear interpolation technique, the amount of calculation was increased, and the storage space was saved by 75% by using the integer geoid height as a grid point. The accuracy of the proposed technique was evaluated through simulation, and it was confirmed that the accuracy of the maximum error is -1.215 m even in the region where the geoid change is rapid.

**Key word** : Real-time geoid calculation, Bi-linear interpolation, Inverse distance weighted interpolation, EGM2008, Embedded system.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.5.374>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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 7 September 2020; Revised 7 October 2020

Accepted (Publication) 16 October 2020 (30 October 2020)

\*Corresponding Author; Chan-sik Park

Tel: +82-43-261-3259

E-mail: chansp@cbnu.ac.kr

## 1. 서론

최근 드론 산업이 급속히 발전하여 드론이 다양한 서비스들을 제공할 수 있게 되면서 그 활용 범위가 확대되고 있다. 이러한 수요를 충족시키기 위해서 대부분의 드론은 비행 중 고도유지 기능을 필요로 한다. 예를 들어 촬영이나 감시 목적의 비행을 할 때 드론이 일정한 고도를 유지하지 못하고 움직이면 카메라 제어와 비행 제어를 동시에 해야 하기 때문에 비행 목적을 달성하기 어렵기 때문이다[1]. 일반적으로 드론의 고도 측정은 관성항법장치 (INS; inertial navigation system)에 내장된 가속도 센서를 이용한다. 이 경우 가속도를 적분하여 고도를 계산하기 때문에 적분 오차가 누적된다. 가속도 센서의 이런 문제를 해결하고자 고도 측정에 전지구항법시스템 (GPS; global positioning system) 고도 정보를 함께 사용한다. GPS 기반의 측위 기술은 개활지에서 그 정확도가 높아 실외 대부분의 위치 정보 서비스에 활용된다. 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. 이와 같이 GPS 음영지역이나 실내 환경에서의 고도측정 정확도를 높이기 위해 기압고도계를 동시에 사용한다. 기압 고도계는 대표적인 고도 측정 센서로 내부와 외부의 압력 차이를 이용하여 고도를 산출한다. 기압 고도계는 GPS와 달리 지형적 환경에 영향을 덜 받고 다른 센서들에 비해 소형이어서 온보드에 내장이 가능하다. 또한 전력 소비가 적으며 대기압을 이용하여 고도를 계산하므로 주변사물의 영향을 거의 받지 않는다는 장점이 있는 반면, 바람이나 온도 등 날씨의 영향을 많이 받는다[1],[3].

앞서 서술한 바와 같이 GPS와 기압고도계는 각각의 장단점이 상호 보완적으로 작동하기 때문에 INS/GPS/기압고도계를 결합하여 수직 위치 정확도를 향상시키기 위한 많은 연구들이 이루어졌다. 하지만, 그림 1과 같이 GPS에서 결정되는 고도와 기압고도계에서 측정하는 고도는 기준점이 서로 다르기 때문에 지오이드 크기만큼의 오차가 발생하며, 이를 보정하기 전에는 결합하여 사용할 수 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 [4]에서는 기압고도를 직접 보정하는 방식이 아닌 기압 고도 측정값의 차분을 이용하였고, [5]에서는 보정과정을 없애기 위하여 별도의 기준국을 설치하여 바이어스 오차를 제거하는 기법이 연구되었다. 기압고도의 변화 비율을 칼만필터의 측정치로 사용한 기존 연구는 고도의 변화가 심할 때 오차가 커질 가능성이 있다. 별도의 기준국을 활용한 연구 [5]의 경우에는 기준국의 기준고도를 이용하여 계산된 오차를 이동하는 항체로 전송하는 방법을 사용했기 때문에 서로 다른 지역에서 해면기압의 차로 인해 발생하는 오차나 지오이드고의 차이로 인해 발생하는 오차에 취약하다. 이런 문제점들을 해결하기 위해 문헌

[2]에서는 기상청에서 제공하는 해면 기압과 해면온도 자료를 온라인으로 획득하여 기압 고도의 산출 및 보정하는 기법을 제시하였다. 또한 국토지리정보원에서 제공하는 온라인 지오이드고 서비스를 통해 획득한 지오이드고를 이용하여 기압고도를 GPS고도로 환산하는 연구를 수행하였다. 하지만, 이 방법은 이동하는 항체가 항상 인터넷에 연결되어야 한다는 제약이 있으며, 웹사이트에 접속하여 특정 정보를 획득하기 위해서 운영자의 개입이 필요하다는 단점이 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위해 본 연구에서는 오프라인에서 동작하는 내장형 시스템에서도 실시간으로 지오이드를 계산할 수 있는 기법을 설계하였다. 이를 위해 EGM2008기반의 지오이드 격자점을 생성하고, 격자점 간격에 따른 지오이드 계산오차와의 상관관계를 확인하였다. 또한 실시간 계산을 위해 2종의 선형 보간법을 채택하였으며, 그 성능을 확인하기 위해 한반도 지역과 동남아시아 지역을 포함하는 영역에서의 보간 성능을 비교하였다. 뿐만 아니라 격자점 개수 증가에 따른 저장 메모리 증가 문제를 해소하기 위해 정수형 지오이드 격자점을 도입하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증하였다. 두 결과를 종합하여 내장형 시스템에서 실시간 지오이드 계산에 가장 적합한 격자점 간격 및 보간법을 결정하였다.

## II. Geoid Data Set and Methods

지오이드란 평균해수면에 가장 가까운 등포텐셜면으로 표고는 평균해수면으로부터의 연직거리 즉, 지오이드로부터의 연직거리로 정의된다. 실제 물리적인 지구는 기복이 심하기 때문에 높이를 결정하기 위해서는 실제 지구와 유사한 가상의 면을 결정하여 이용하게 된다. 이 때, 지구 표면의 약 70%가 바다로 이루어져 있기 때문에 평균해수면에 가장 가까운 면을 이용하는데, 지오이드가 평균해수면과 가장 가까운 면이므로 지오이드는 수직위치의 기준면이 된다.

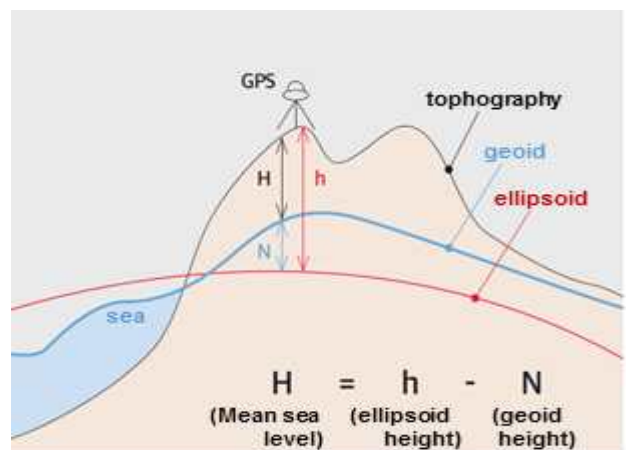


그림 1. 해발고도(기압고도), 타원체고, 지오이드고  
 Fig. 1. Mean sea level, ellipsoid height, geoid height.

타원체고는 기하학적으로 정의된 타원체면에 수직인 거리를 의미하며, GPS는 WGS84(world geodetic system 84) 타원체 모델을 사용한다. 지오이드와 타원체 사이의 높이 차이를 지오이드 고도라 한다. 실제 표고와 타원체고는 기준면이 상이하므로 두 높이 사이에는 연직선편차가 발생하지만 몇 가지 가정을 바탕으로 하면 타원체고와 지오이드고의 차이를 표고로 이용할 수 있다. 그림 1에서 해발고도, 타원체고 및 지오이드고 간의 관계를 잘 보여주고 있다.

**2-1 Geoid Dataset**

원하는 지점의 지오이드를 계산하기 위해서는 정밀한 지오이드 모델이 필요하며, 높은 차수의 다항식을 실시간으로 계산해야 하기 때문에 내장형 시스템에서는 적용이 불가능하다. 국내에서는 2014년 한반도 지역의 육상과 해상을 아우르는 KNGeoId14 모델이 국토지리정보원 주관으로 개발되었으며 온라인에서 이용가능하다. 한반도 주변의 지오이드 고도를 KNGeoId14를 이용해서 계산한 결과를 그림 2에서 확인할 수 있으며, 한반도 지역의 지오이드 편차는 약17 m에서 30 m까지임을 확인할 수 있다.

지구 전역을 대상으로 현존하는 지오이드 모델 중 가장 대표적인 것은 미국의 국가지리정보국 (NGA; National Geospatial-Intelligence Agency)에서 개발한 2160차수의 다항식으로 이루어진 EGM2008 (earth gravity model 2008)이다. 그림 3에서 지구 전역에서 타원체로부터의 지오이드 편차는 +85 m (아이슬란드)에서 -106 m (인도 남부)이며 최대, 최소값의 차이는 대략 200m 미만이다. 본 연구에서는 전지구 범위에서 실시간으로 지오이드를 계산하기 위해서 EGM2008기반으로 격자점을 생성하였다. 기준 값이 되는 격자점은 위도 및 경도 단위로 등 간격으로 생성하였으며, 그림 4와 같은 과정을 통해 지오이드 격자점을 생성하였다. 이 과정에서 격자점 위치에서의 지오이드 값은 NGA에서 제공하는 2160차의 원도우용 지오이드 계산프로그램인 “hsynth\_WGS84.exe”을 사용하였다[6].

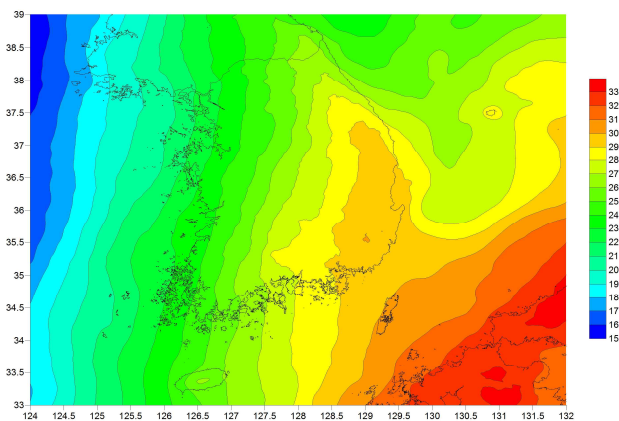


그림 2. 한반도 지역 지오이드 분포  
Fig. 2. Geoid undulation in the korean peninsula.

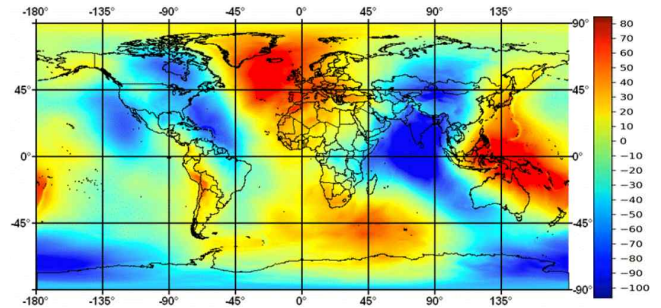


그림 3. 전 지구 지오이드 고(EGM2008)  
Fig. 3. Global geoid height(EGM2008)

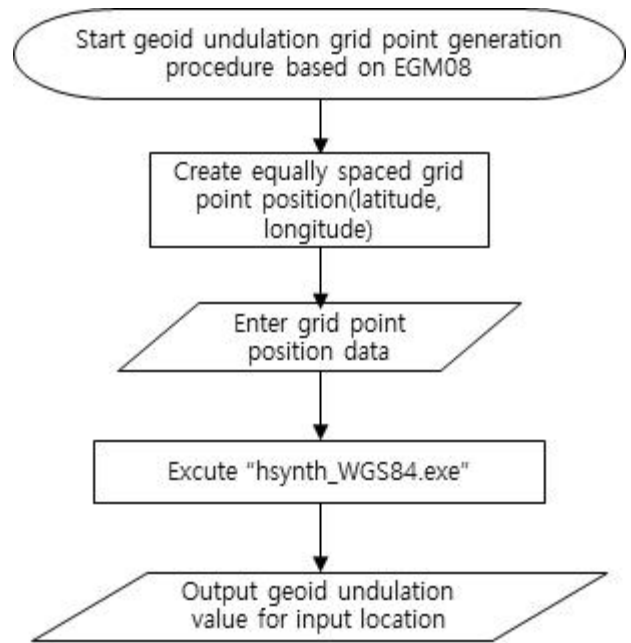


그림 4. 지오이드 격자점 생성 흐름도  
Fig. 4. Geoid grid point generation flow chart.

**2-2 Interpolation Methods**

이 섹션에서는 이 연구에 사용 된 2종의 보간 방법을 간략하게 소개한다. 보간법은 공간 데이터에 대한 독립 변수의 중간 미지점을 잠재적으로 생성 할 수 있는 통계 기술이다. 모든 보간법은 “거리가 가까울수록 관련성이 높다”는 Tobler의 첫 번째 지리 법칙 (the law of geography)을 기반으로 한다. 공간에서의 보간법은 그 보간법의 가정, 국지적 또는 전역적 관점, 그리고 결정론적 또는 확률적 요소에 따라 달라진다. 많은 보간 기술이 존재하며 그 선택은 주로 데이터의 특성에 달려 있다. 지오이드 고도 데이터는 규칙적인 간격의 격자로 구성된 데이터 셋을 추출할 수 있기 때문에 그리드기반의 보간 법 및 비 균등 격자점 방식의 보간법을 모두 적용할 수 있다. 드론에서 실시간으로 지오이드 고를 계산하여 보상하기 위해서는 많은 계산이 요구되는 복잡한 방식의 보간법은 사용할 수 없다.

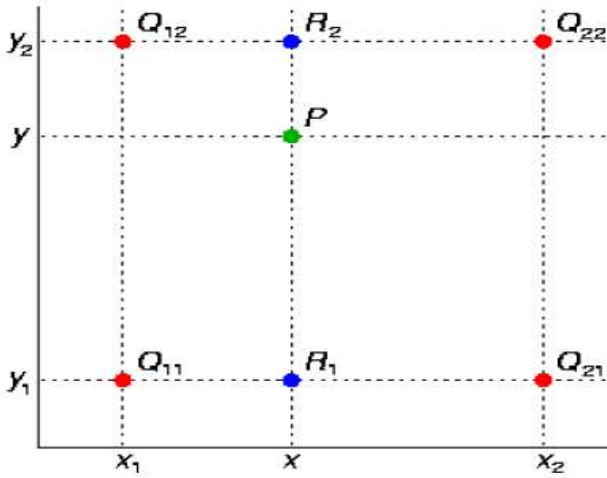


그림 5. 쌍 선형 보간 예시  
Fig. 5. Bi-linear interpolation concept diagram.

따라서 본 연구에서는 2차원 보간법 중 가장 대표적이면서도 효율적인 쌍 선형 보간법 (bi-linear interpolation) 및 비 균등 격자점 방식에서 가장 많이 사용되는 역거리가중 (IDW; inverse distance weighted) 보간법을 지오이드 고 계산에 사용하였다. 역거리가중 보간법은 지리학적 공간에 기반 한 공간 보간법 중 하나이다. 임의의 주어진 두 지점의 특성치가 연결되어 있지만 그것들의 유사성은 두 위치 사이의 거리에 반비례한다는 원리를 이용하여 미지 점의 특성 값을 계산할 수 있다. 또한 표준적인 공간내삽법으로 사용되어왔으며, GIS 프로그램에서도 효율적으로 사용되어왔다. 쌍 선형 보간법 및 IDW의 개념에 대한 예시를 그림 5, 6에서 확인할 수 있다.

1) Bi-Linear Interpolation

선형 보간은 선형 다항식을 사용하여 주어진 격자점 사이에서 알려진 두 지점 사이에 직선을 유도하는 수치분석 기술이다. 쌍 선형 보간은 이 아이디어를 확장하고 2차원 보간법을 수행한다[7]. 쌍 선형 보간에 사용되는 방정식은 다음과 같다.

$$R_1 = \frac{(x_2 - x)}{(x_2 - x_1)} Q_{11} + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} Q_{21} \tag{1}$$

$$R_2 = \frac{(x_2 - x)}{(x_2 - x_1)} Q_{12} + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} Q_{22} \tag{2}$$

$$P = \frac{(y_2 - y)}{(y_2 - y_1)} R_1 + \frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} R_2 \tag{3}$$

여기서 \$P\$는 보간법을 통해 구하고자 하는 데이터 값이고, \$x, y\$는 미지 값 \$P\$가 위치하는 지점, \$Q\_{11}, Q\_{12}, Q\_{21}, Q\_{22}\$는 각각 격자점 \$(x\_1, y\_1), (x\_1, y\_2), (x\_2, y\_1), (x\_2, y\_2)\$에서의 데이터 값이다.

2) IDW Interpolation

역거리가중법(IDW)은 개념이 간단하며 계산이 복잡하지 않고, 지리적 공간에서의 보간법을 위해 적용된다. 역거리가중법은 예측되지 않은 지점의 속성 값은 이웃한 지점의 알고 있는 값의 가중평균이라는 가정에 기초한다. 알고 있는 지점의 흠어진 값들을 사용하여 미지 점의 값을 예측하는 것이다. 이것은 미계측 지역으로 정보를 변환하기 위한 \$n\$개 지역 값들의 가중된 평균으로써 계산된다. IDW 방법에는 예측 효율에 영향을 미치는 중요한 변수로 거리감쇠계수(distance decay parameter)가 있다. 거리감쇠계수는 결과적으로 거리 가중치를 보정하는 것으로 지점 사이의 공간 보간법에 사용된다. 일반적으로 IDW를 적용할 경우, 거리-감쇠 관계는 전 지역에 걸쳐 일정하다고 가정한다[8-9]. IDW는 아래와 같은 식을 사용하여 계산된다.

$$w(x) = \frac{A}{B} \tag{4}$$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x, x_i)^p} u_i \tag{5}$$

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x, x_i)^p} \tag{6}$$

여기서 \$w\$는 위치 \$x\$에서의 계산하고자 하는 보간 값이고, \$x\_i\$는 주변 격자점의 위치, \$p\$는 거리감쇠계수, \$d(x, x\_i)\$는 \$x\$와 격자점 \$x\_i\$간의 거리, \$u\_i\$는 위치 \$x\_i\$에서의 데이터 값을 의미한다.

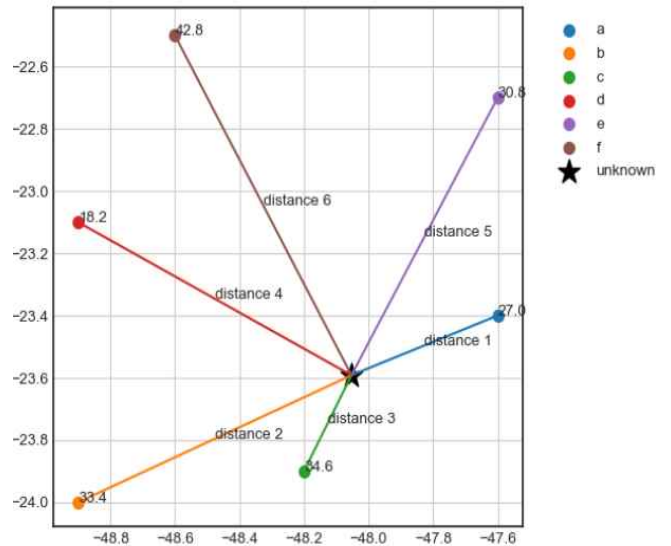


그림 6. 역거리가중법 예시  
Fig. 6. IDW interpolation concept diagram.

### III. 시뮬레이션 및 성능평가

보간법을 이용해서 내장형 시스템에서 실시간으로 지오이드를 계산하기 위해서는 연산량과 메모리 크기 두 가지를 고려해야 한다. 제안된 보간법의 경우 연산량은 실시간 계산에 문제가 되지 않지만 격자점 개수의 증가에 따른 저장 공간의 확대는 내장형 시스템에서 문제가 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 먼저 격자점 간격에 따른 정확도를 분석하고, 일정범위 이내의 오차를 갖는 격자간격에 대해 지오이드 자료형을 변경하여 메모리 크기를 절약하면서도 정확도를 만족시킬 수 있는 격자점 간격을 결정할 것이다. 정확도 평가를 위해 한반도 지역(위도;33°~39°, 경도;124°~132°)과 동남아시아 지역(위도;0°~45°, 경도;90°~135°)을 0.01°간격으로 샘플링하여 EGM2008에서 2160차로 계산된 지오이드 값과 보간법을 이용해서 계산된 결과를 비교하였다. 보간법을 적용하기 위해서는 격자점이 필요하며, 본 논문에서는 격자점 간격을 표1과 같이 1°, 0.5°, 0.2°, 0.1°의 4가지 case로 구분하여 격자점 간격에 따른 2가지 보간법의 보간 성능을 각각 비교하였다. 지오이드 계산프로그램인 “hsynth\_WGS84.exe”를 사용하여 계산된 지오이드 값은 유효숫자가 mm 단위까지 표시되어 소수점 3자리까지 출력된다. 3-1절에서는 제시된 보간법의 정확도 비교를 위해서 지오이드 보간에 적용되는 격자점 간격을 1.0°, 0.5°, 0.2°, 0.1°으로 설정하여 한반도 지역과 동남아시아 지역에서 보간 정확도를 분석하였다. 정확도 분석을 위한 기본 위치는 위도/경도 간격이 0.01°가 되도록 설정하여 한반도 지역에서는 478,601개의 표본이 선정되었고, 동남아시아 지역은 위도 0°~45°, 경도 90°~135°에 걸쳐 20,241,000개의 표본을 선정하였다. 3-2절에서는 실제 드론에 탑재하는 경우를 가정하여 격자점의 저장 공간을 절약하기 위해서 표2와 같이 지오이드 값을 “round()” 함수를 이용하여 1 byte의 정수형 변수로 계산한 결과와 float 형의 실수형 변수로 계산한 결과를 격자점 간격 0.2°, 0.1°에 대하여 정확도 분석하고 결과를 비교하였다.

표 1. 격자간격에 따른 시뮬레이션 조건

Table 1. Simulation condition for grid point distance.

	Grid distance	Number of grid(float type)	Grid size
Case 1	1°	$((180+1) \times 1) \times (360 \times 1) = 65,160$	254.5KB
Case 2	0.5°	$((180+1) \times 2) \times (360 \times 2) = 260,640$	1018.1KB
Case 3	0.2°	$((180+1) \times 5) \times (360 \times 5) = 1,629,000$	6363.2KB
Case 4	0.1°	$((180+1) \times 10) \times (360 \times 10) = 6,516,000$	24.86MB

표 2. 정수형 지오이드고 사용 시 시뮬레이션 조건

Table 2. Simulation condition for integer geoid value.

	Grid distance	Number of grid(integer type)	Grid size
Case 5	0.2°	$((180+1) \times 5) \times (360 \times 5) = 1,629,000$	1590.8KB
Case 6	0.1°	$((180+1) \times 10) \times (360 \times 10) = 6,516,000$	6363.2KB

### 3-1 격자점 간격에 따른 정확도 분석

본 절에서는 표 1에서 제시한 조건으로 시뮬레이션을 수행한 결과에 대해서 분석하였다. 보간법에 사용되는 격자점의 간격은 case1~4의 4가지 경우로 구분하였고, 분석대상 지역은 비교적 지오이드 고 변화가 적은 한반도 지역과 급격한 지오이드고 변화를 보이는 동남아시아 지역에 대해서 수행하였다. 한반도 지역에 대한 지오이드 보간 결과는 그림 7~8, 그림 11~12와 표 3을 통해서 확인할 수 있다. 격자점 간격이 넓을수록 보간 오차가 증가하고 쌍 선형 보간법에 비해서 IDW 보간법의 오차가 큰 것을 알 수 있다. 한반도 지역만을 특정했을 경우 case1~4에 시뮬레이션 결과 지오이드 보간 오차가 모두 최대 2m 이내의 의미 있는 결과를 보여준다. 그림 2에서도 확인할 수 있듯이 한반도 지역은 지오이드 변화가 완만하기 때문에 격자점이 간격이 넓어도 보간 오차 크지 않음을 확인할 수 있다.

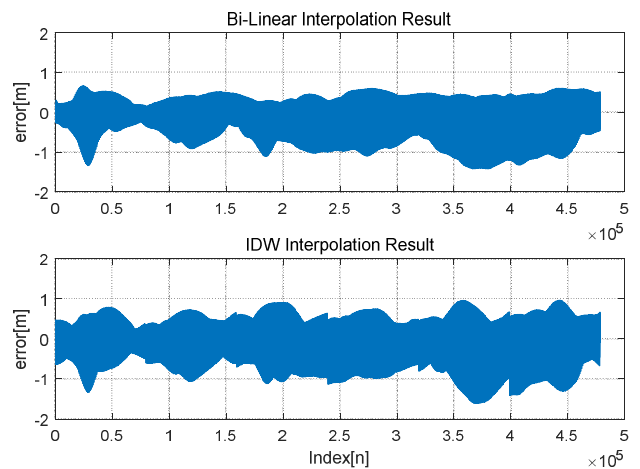


그림 7. 지오이드 보간 오차(한반도 지역, grid size=1.0°)  
Fig. 7. Geoid interpolation error(korea, grid size=1.0°)

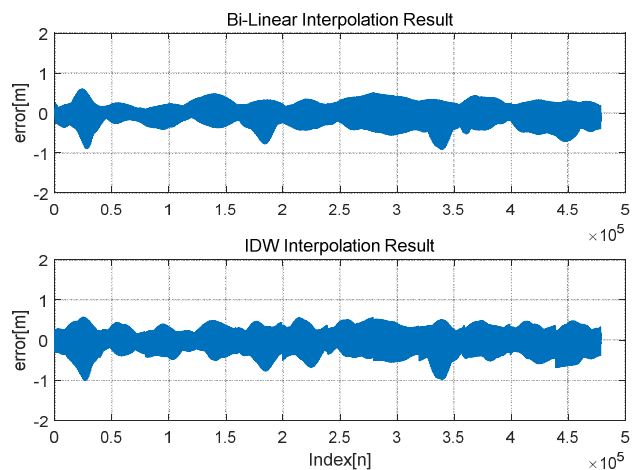


그림 8. 지오이드 보간 오차(한반도 지역, grid size=0.5°)  
Fig. 8. Geoid interpolation error(korea, grid size=0.5°)

표 3. 한반도 지역의 격자간격에 따른 시뮬레이션 결과

Table 3. Results for grid point distance(korea peninsula)

Grid distance	Method	Error mean	Standard deviation	Maximum error	RMSE
1°	BL	-0.066	0.292	-1.423	0.299
	IDW	-0.065	0.340	-1.614	0.346
0.5°	BL	-8.51E-03	0.140	-0.912	0.140
	IDW	-7.46E-03	0.166	-1.004	0.166
0.2°	BL	-1.13E-03	0.044	-0.573	0.044
	IDW	-7.45E-04	0.059	-0.570	0.059
0.1°	BL	-2.84E-04	0.014	-0.198	0.014
	IDW	1.35E-04	0.025	-0.237	0.025

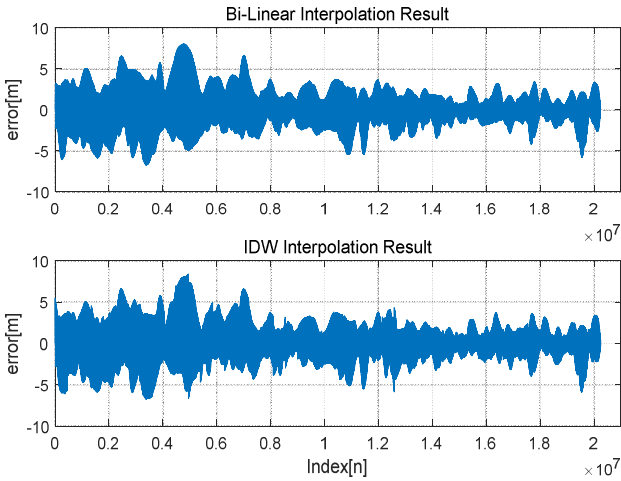


그림 9. 지오이드 보간 오차(동남아시아, grid size=1.0°)

Fig. 9. Geoid interpolation error(grid size=1.0°)

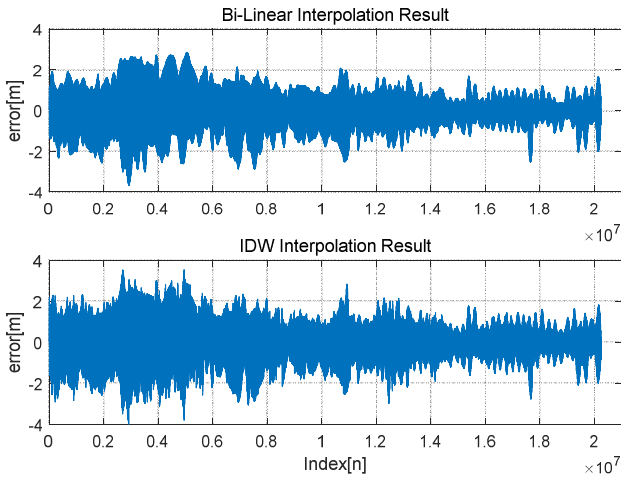


그림 10. 지오이드 보간 오차(동남아시아, grid size=0.5°)

Fig. 10. Geoid interpolation error(grid size=0.5°)

표 4. 동남아 지역의 격자간격에 따른 시뮬레이션 결과

Table 4. Results for grid point distance(southeast asia)

Grid distance	Method	Error mean	Standard deviation	Maximum error	RMSE
1°	BL	-1.13E-02	0.729	8.009	0.729
	IDW	-1.04E-02	0.771	8.386	0.771
0.5°	BL	-7.55E-04	0.298	-3.687	0.298
	IDW	4.17E-04	0.332	-3.998	0.332
0.2°	BL	-1.96E-04	0.075	-0.903	0.075
	IDW	-3.03E-04	0.099	-1.527	0.099
0.1°	BL	-3.87E-05	0.023	-0.349	0.023
	IDW	-1.49E-04	0.041	-0.707	0.041

지오이드 고 변화가 큰 동남아시아 지역의 보간 정확도는 그림 9~10, 그림 11~12 및 표 4를 통해 확인할 수 있다. 한반도 지역의 결과와는 다르게 격자점 간격 1.0°, 0.5° case는 최대 오차가 각각 대략 8 m, -4 m 정도로 상대적으로 큰 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 동남아시아 지역을 대상으로 한 시뮬레이션 결과를 통해 쌍 선형 보간법의 경우 전 지구 대상으로 보간법을 통한 지오이드 계산에는 격자점 간격이 최소 0.2° 이내 일 때 1m 내외의 보간 정확도를 확보할 수 있음을 추정할 수 있다.

### 3-2 지오이드 자료형에 따른 정확도 분석

격자점 간격이 좁을수록 지오이드 계산 정확도가 높아지지만, 실제로 드론 등에 적용하기 위해서는 격자점 저장용량이 제한이 존재한다. 전 지구영역에서 지오이드 고는 -106 m ~ +85 m 범위에 존재하기 때문에 1 byte 정수형으로 표현가능하다. 따라서 본 절에서는 격자점에 사용되는 지오이드 값을 'round()' 함수를 사용하여 4 byte 실수형 변수를 1byte 정수형 변수로 변환 후 실수형 변수를 사용한 경우와 오차를 비교하였다. 그림 11과 표 5는 한반도 지역의 시뮬레이션 결과를 정리하였고, 그림 12와 표 6은 동남아시아 전역에 대한 결과를 정리하였다. 표 5에서 볼 수 있듯이 한반도 지역에서는 격자점 간격이

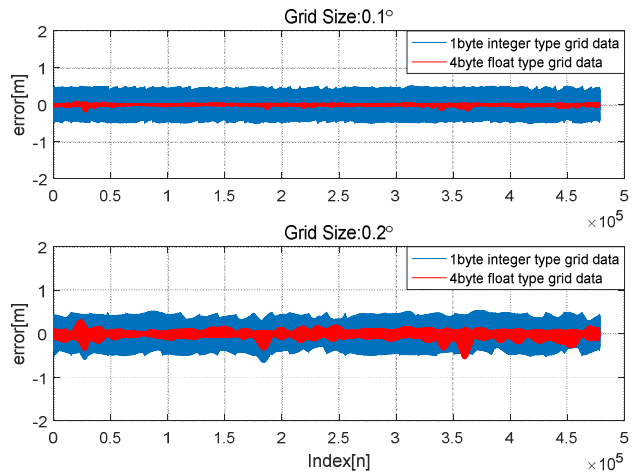


그림 11. 지오이드 자료형에 따른 보간 오차(한반도 지역)

Fig. 11. Error according to geoid data type.

표 5. 한반도 지역의 지오이드 자료형에 따른 시뮬레이션 결과

Table 5. Results for geoid data type(korea peninsula)

Grid distance	Method	Error mean	Standard deviation	Maximum error	RMSE	
0.2°	BL	float	-1.13E-03	0.044	-0.573	0.044
		integer	-1.54E-02	0.193	-0.657	0.194
	IDW	float	-7.45E-04	0.059	-0.570	0.059
		integer	-1.50E-02	0.204	-0.768	0.204
0.1°	BL	float	-2.84E-04	0.014	-0.198	0.014
		integer	-6.36E-03	0.216	0.514	0.216
	IDW	float	1.35E-04	0.025	-0.237	0.025
		integer	-5.92E-03	0.220	0.521	0.220

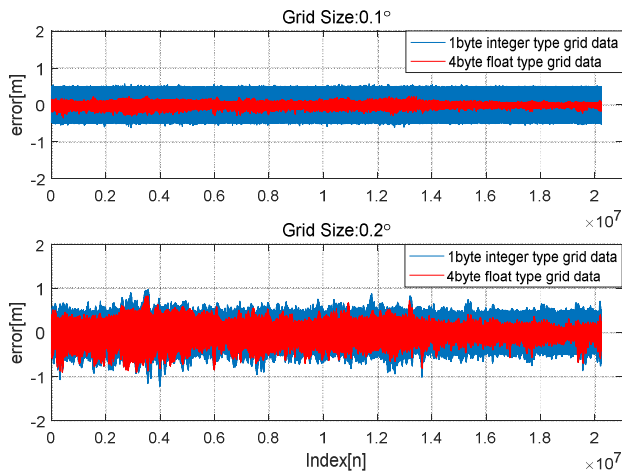


그림 12. 지오이드 자료형에 따른 보간 오차(동남아 지역)  
 Fig. 12. Error according to geoid data type.

표 6. 동남아 지역의 지오이드 자료형에 따른 시뮬레이션 결과  
 Table 6. Results for geoid data type(southeast asia)

Grid distance	Method	Error mean	Standard deviation	Maximum error	RMSE	
0.2°	BL	float	-1.96E-04	0.075	-0.903	0.075
		integer	1.85E-03	0.204	-1.215	0.204
	IDW	float	-3.03E-04	0.099	-1.527	0.099
		integer	1.74E-03	0.222	-1.550	0.222
0.1°	BL	float	-3.87E-05	0.023	-0.349	0.023
		integer	1.31E-03	0.204	-0.624	0.204
	IDW	float	-1.49E-04	0.041	-0.707	0.041
		integer	1.19E-03	0.213	-1.025	0.213

0.2°인 경우 실수형 지오이드와 정수형 지오이드가 유사한 결과를 보여준다. 그리고 격자점 간격이 0.1°인 경우 실수형 지오이드의 최대 오차가 정수형 지오이드 오차의 약 1/3 정도 되며, 정수형일 때는 격자점 간격에 관계없이 유사한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 표 1과 표 2에 따르면 격자점 간격이 0.2°일 경우 실수형 변수는 대략 6.3 MB의 메모리가 필요하고, 정수형 변수는 약 1.6 MB의 메모리가 확보되어야 한다. 격자점 간격이 0.1°인 경우는 0.2° 간격에 비해 4배의 메모리를 차지하며 대략 24.8 MB와 6.3 MB의 메모리가 필요하다. 요구되는 메모리 크기 및 최대 오차를 고려할 때 내장형 시스템에 가장 적합한 조합은 0.2°의 격자점 간격을 정수형으로 저장하는 경우가 가장 효율적이라고 판단된다.

IV. 결론

드론이나 자율주행 차량에 적용되는 내장형 시스템에서 수직위치의 측정 정확도를 개선하기 위해서 대표적으로 사용하는 기법이 GPS와 기압고도계의 장점을 융합하여 사용하는 것

이다. 두 센서를 융합해서 사용하기 위해서는 지오이드 고도를 보상해 주어야 하는데, 전지구 범위로 사용가능한 지오이드 모델인 EGM2008은 2160차의 다항식으로 구성되어 있어 드론이나 자율주행차에 적용된 내장형 시스템에서는 실시간으로 지오이드 보상이 불가능하다.

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 보간법을 적용하여 내장형 시스템에서도 실시간으로 지오이드를 계산하는 기법에 대하여 연구하였다. 격자점 간격에 따른 정확도 분석을 위해 EGM2008을 사용하여 간격이 1°, 0.5°, 0.2°, 0.1°이 되도록 격자점을 구성하여 한반도 지역과 동남아시아 지역을 대상으로 쌍 선형 보간과 IDW 보간법에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 분석결과 격자점 간격이 조밀할수록 보간 오차가 작아지고, IDW에 비해 쌍 선형 보간법의 정확도가 높은 것을 확인하였다. 쌍 선형 보간법의 오차는 0.2°/0.1° 격자점 사용시 한반도 지역에서는 최대 -0.573 m / -0.198 m였고, 동남아시아 지역에서는 최대 -0.903 m / -0.349 m로 지오이드 계산에 보간법 적용이 유용함을 확인하였다.

지오이드 자료형에 따른 정확도 분석은 내장형 시스템에 적용하기 위해 지오이드 격자점을 실수형과 정수형으로 각각 저장하여 그 결과를 분석하였다. 0.2°/0.1° 간격의 격자점에 대해 실수형 격자점은 6.3 MB / 24.8 MB, 정수형 격자점은 1.6 MB / 6.3 MB의 저장 공간이 필요하며 정수형이 실수형에 비해 75%의 메모리가 절약됨을 확인하였다. 실수형 지오이드고 사용시 보간 오차는 0.2°/0.1° 격자 간격 사용시 한반도 지역은 최대 -0.657 m / 0.514 m의 오차가 발생하였고, 동남아시아 지역에서는 최대 -1.215 m / -0.624 m의 오차가 발생함을 확인하였다. 결과적으로 내장형 시스템에 적용가능한 지오이드 결정 기법은 쌍 선형 보간법을 정수형 지오이드를 0.2° 격자 간격으로 적용하는 것임을 확인할 수 있었다.

References

[1] D. H. Kim, B. R. Yun, S. H. Lee and W. J. Lee, "Improvement of altitude measurement algorithm based on accelerometer for holding drone's altitude," *KIPS Transactions on Software and Data Engineering*, Vol. 6, No. 10, pp. 473-478, Oct. 2017.

[2] L. W. Kim, K. H. Choi, J. H. Lim, W. J. Yoo and H. K. Lee, "Improving GPS vertical error using barometric altimeter," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 29-36, Feb. 2016.

[3] M. S. Han, "Improvement of filtering method of digital pressure sensor for drone altitude measurement," *The Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 27, No. 6, pp. 537-542, 12. 2017.

[4] 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.

[5] 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, Jul. 2013.

[6] National geospatial-intelligence agency software and coefficients for WGS 84 geoid undulation computations by harmonic synthesis. Available: [https://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](https://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html).

[7] I. Ashraf, S. J. Hur and Y. W. Park, "An investigation of interpolation techniques to generate 2D intensity image from LIDAR data," *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 8250-8260, 4. 2017.

[8] J. M. Ahn and I. H. Park, "An assessment on the hydraulic characteristics of a multi-dimensional model in response to measurement resolution and spatial interpolation methods," *The Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 43-51, 3. 2012

[9] W. Luo, M. C. Taylor and S. R. Parker, "A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales," *International Journal of Climatology*, Vol. 28, pp. 947-959, 2008.



**김 현 석 (Hyun-Seok kim)**

2003년 : 한양대 전기전자공학부 (공학사)  
 2005년 : 서울대학교 전기전자공학부 (공학석사)  
 2005년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원  
 ※ 관심분야 : 관성항법시스템, 위성항법시스템, 추정 이론, INS/GPS



**박 찬 식 (Chansik Park)**

1984년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)  
 1986년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)  
 1997년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)  
 1997년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 교수  
 ※ 관심분야 : GNSS, PNS, SDR, 미지정수결정, 오차해석