한국측지학회지, 제 17 권 제 3 호, pp. 283~292(1999년 9월 30일)

# GPS를 이용한 항공삼각측량
# GPS-Assisted Aerotriangulation

김감래* · 김충평** · 윤종성***
Kim, Kam-Lea · Kim, Choong-Pyung · Yoon, Jong-Seong

**要 旨**

본 논문에서는 대축척 항공 사진(1/5,000)을 촬영할 때 수신한 GPS 자료를 처리하여 결정한 항공 사진 카메라의 투영중심 위치를 이용한 항공삼각측량에 대해서 연구하였다. 항공삼각측량에 적용 가능성을 검토하기 위해 GPS 자료를 처리하여 모델 조정법으로 결정한 투영중심의 위치와 비교하여 정확도 및 오차를 분석하였다. 또한, GPS 자료로 결정한 투영중심의 위치를 광속 조정법에 적용하였다. 기준국으로부터 30 km이내인 경우 L1 반송파 자료를 이용하여 결정한 투영중심 위치의 정확도는 일정하고, 4개의 기준점으로 평면(XY) 정확도(RMS)는 13 cm, 높이(Z) 정확도(RMS)는 15 cm로 수치지도 제작에 필요한 정확도를 얻을 수 있었다. 따라서, GPS를 항공삼각측량에 이용함으로써 경제적인 지도 제작 방안을 제시하였다.

**ABSTRACT**

Aerotriangulation for the large scale mapping(photo-scale 1/5,000) was studied with the projection center determined by kinematic DGPS positioning. For the feasibility study, the accuracy and error was analyzed with the comparison between a projection center from the conventional model adjustment and the projection center determined by the kinematic DGPS positioning. Kinematic DGPS-supported Bundle adjustment was also performed. The accuracy of projection center, determined by L1 phase data observed within 30 km from base station, was stable, and the planimetric accuracy(RMS) is 13 cm and the vertical accuracy(RMS) is 15 cm with 4 ground control points, which satisfies the national standard of digital mapping. Thus, this study shows that GPS-assisted aerotriangulation can be used for economic digital mapping.

## 1. 서 론

항공사진측량 방법으로 지형도를 제작하기 위해서는 각 사진 또는 모델에 대한 지상기준점이 필요하고 이를 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되는 지상측량이 필수적이다. 우리 나라에서 70년대 이후 항공삼각측량 프로그램을 사용하면서 지상측량 작업에 소요되는 시간과 비용을 획기적으로 절약할 수 있게 되었다. 그러나, 항공삼각측량 프로그램의 사용에도 불구하고, 지형도 제작을 위한 항공삼각측량에 필요한 지상측량 작업에 소요되는 비용은 전체 지도 제작비용의 30~50%를 차지하고 있다. 지상기준점의 수를 줄이기 위해서 사진측량학자들은 기압계, Radar, APR(Airborne Profile Recorder), INS (Inertial Navigation System)등의 다양한 센서를 사용하는 방법을 연구해 왔다.

1980년대 초부터 인공위성을 이용한 위치결정시스템인 GPS(Global Positioning System)가 위치결정에 아주 우수하고 경제적인 방법으로 사용되었고, 항공사진측량 분야에서는 실시간 위치를 관측할 수 있게 됨에 따라 항로를 정확하게 결정하여 촬영시 중복도 축소에 적용하고, 촬영 결과를 신속하게 분석할 수 있는 계기가 되었다. 또한 반송파 위상(carrier phase)을 이용하여 mm나 cm 수준의 정확한 위치를 결정할 수 있고, 이동중 초기화 기법(OTF : On-The-Fly)의 발달에 따라 GPS 관측자료를 후처리하여 항공기에 탑재된 촬영용 카메라의 투영중심의 위치를 정확하게 결정할 수 있게 됨에 따라 지상측량 작업을 최소화하기 위한 항공삼각측량 분야의 연구가 외국에서 집중적으로 수행되어 왔다. 국내에서도 GPS 항

*명지대학교 토목 · 환경공학과 교수
**명지대학교 박사과정 수료
***한국공항(주) 기술연구소 전문연구원

공삼각측량에 대한 연구가 일부 이루어졌으나, 모의 실험이나, 외국의 자료와 프로그램을 사용함으로써 국가기본도 제작과 직접적으로 관련된 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구의 목적은 국내에서 관측한 자료를 사용하여 GPS를 이용한 항공삼각측량으로 지상측량 작업을 줄여 경제적인 대축척(1/5,000 이하) 수치지도를 제작할 수 있는 정확도를 확보하는데 있다. 이를 위해서는 촬영시 일정한 시간 간격으로 관측한 GPS 자료를 처리하여 각 시각에 대한 좌표를 계산하고, 촬영 당시의 정확한 노출시간 자료와 보간법(interpolation)으로 카메라 투영중심의 위치를 결정하여 정확도 분석을 통해 각각의 특성을 비교 분석하였다. 또한, GPS에 의한 동적 위치결정과 좌표변환을 위한 변환계수산정을 위해 기준국과의 거리에 의한 영향과 기준점의 수와 배치에 따른 결과를 분석하여 GPS 항공삼각측량을 위한 운영 방안을 제시하였다. 또한, 기선거리에 의한 영향과 GPS 항공삼각측량에서 고려해야 하는 많은 보정값들 가운데 최소의 보정값들을 이용해 얻어진 결과가 기존의 모델 조정법에 의해 계산된 투영중심 좌표와 비교하여 항공삼각측량에의 적용가능성을 연구하였다.

항공기 회전에 의한 신호단절로 나타나는 모호 정수(Ambiguity)와 전리층 및 대류층에 의한 신호 지연으로 발생하는 코스별 투영중심의 위치 오차는 선형 변위와 편류(drift)로 나타난다. 선형 변위와 편류에 대한 관측방정식을 기존의 광속 조정법에 포함시켜 사진기준점 및 지상기준점과 동시에 코스별 투영중심의 위치를 조정하는 프로그램을 작성하였다. 기준점의 배치에 따른 광속조정 결과의 정확도를 비교 분석하여 경제적인 항공삼각측량 방안을 제시하였다.

## 2. GPS 관측 및 자료 처리

### 2.1 항공사진 촬영

본 연구에서는 1998년 4월 3일 과천지역의 축척 1/1,000 수치 지도 갱신을 위해 촬영한 항공사진 및 GPS 관측자료를 사용하였다. 촬영 대상 지역은 넓이 10 km× 7 km인 과천 시가지 부분으로 북서쪽에 관악산, 남동쪽에는 청계산으로 둘러싸여 있어, 촬영 방향을 남서쪽에서 북동쪽으로 하였다. 항공사진은 1/1,000 수치 지도제작에 적합한 축척 1/5,000으로 촬영하였고, 촬영 지역의 평균 지반고를 고려하여 촬영 고도를 약 870 m, 항공기 속도는 약 260 km/h(72 m/sec)를 유지하였다. 항공사진 중복도는 종중복(overlap) 60%, 횡중복(sidelap) 30%로 9개 코스에 117매의 항공사진을 촬영하였다. 촬영에 사용한 렌즈는 초점거리 152.85 mm인 광각 렌즈를 사용하였고, 촬영 당시의 대기 조건을 고려하여 황색 필터(420nm)를 사용하였다.

그림 1은 항공기내 설치된 RC-30 항공사진 카메라와 GPS 수신기 및 촬영시간 기록장치의 사진이다. 촬영에 사용한 항공기는 단발 엔진의 프로펠러를 장착한 Cessna C208이고, 항공 사진 카메라는 스위스 Leica사의 RC-30으로 GPS 수신기와 정확한 촬영 시간을 기록하는 장치(TDU : Time Digitizing Unit)와 동시에 작동하도록 구성되어 있다. 항공기에 장착된 SR299 GPS 수신기는 1

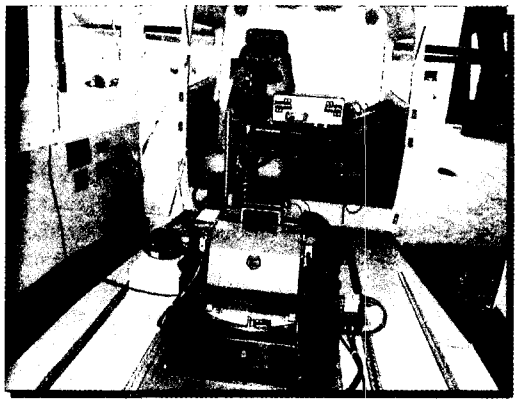


그림 1. RC-30 카메라 및 GPS

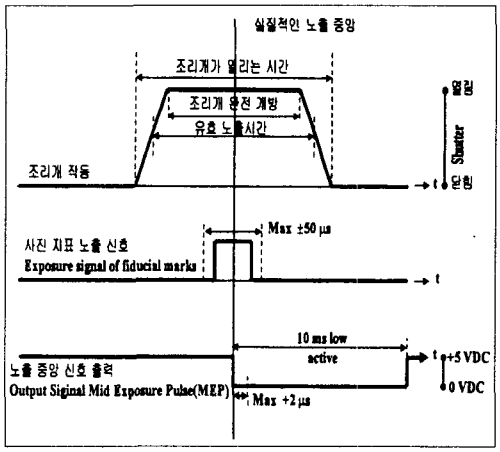



그림 2. RC-30 카메라 촬영 시간 신호

초 간격으로 위성자료를 수신하여 저장하면서 정확한 촬영 시각을 저장하는 장치인 TDU에, GPS 위성 시간으로, 매초에 해당하는 시간 신호(Time Mark : PPS)를 보내준다. 또한, 항공 사진을 촬영하는 순간 항공 사진 카메라에서는 조리개가 열리는 시간 동안의 중앙에서 출력되는 신호(그림 2 참조)를 TDU에 보낸다. TDU는 항공 사진 카메라에서 오는 신호를 수신하는 순간의 GPS 시간을 저장한다. 촬영할 때 카메라에서 TDU로 송신하는 전기 신호는 셔터가 열리는 시간에서 최대 +2μsec의 오차를 가지고, TDU의 시간 정확도 $\pm 10^{-4}$초이므로 항공기의 속도(72 m/sec)에 따른 기계적인 시간 오차로 인한 거리 오차는 ±7.2 mm로 항공삼각측량 조정과정에서 무시할 수 있다.

연속이동측량의 후처리에 필요한 기준국은 촬영지역의 중앙, 인천 인하대와 서울 한국항공에 각각 한 개소를 설치하였다. 기준국에는 측지측량용으로 2주파 수신이 가능한 Trimble 4000SSi를 설치하여 항공기용 GPS와 동일한 수신 간격(1초)으로 GPS 자료를 관측하였다.

### 2.2 기준국 설치 및 측량

연속이동관측 처리 및 기준점 측량의 정확도를 확보하기 위해 경기도 수원시에 위치한 국립지리원과 인천에 위치한 인하대학교의 상대거리를 측정하여, GPS 위성의 궤도정보를 방송력과 정밀력으로 구분하여 시간의 길이에 따른 기선거리의 변화를 측정하였다. 9시간 30분 동안 관측한 자료를 정밀력으로 기선길이를 결정한 후 각 시간 단위로 기선거리를 계산한 자료와 비교한 결과, 위성의 방송력이나 정밀력에 관계없이 기선거리에 큰 영향을 미치지 않으며, 1시간 관측자료로도 1 cm 이내 정확도로 기선거리를 결정할 수 있었다.

WGS84 좌표체계상에서 연속이동관측 값을 처리하기 위한 기준국의 좌표를 결정하기 위해 국립지리원의 GPS 상시관측소, 인하대학교, 한국항공, 항공사진 촬영 대상 지역인 과천에서 10시간 동안 GPS 위성 자료를 관측하였고, 계산 결과 최대 표준편차(σ)는 1.2 cm로 나타났다. GPS 표준 좌표계(WGS84)로 부터 우리 나라 TM 좌표계로 좌표변환을 위해서, 국립지리원을 기준국으로 정밀관측을 통해 WGS84 좌표와 TM 좌표를 결정한 인하대, 한국항공, 안산과 광교산의 정밀1차 삼각점에서 정지측량 방식으로 3시간 이상 Trimble 4000SSi(측지측량용 2주파수 수신기)로 관측하였다.

### 2.3 투영중심의 위치 결정

항공삼각측량에 사용될 투영중심의 위치를 결정하기 위한 GPS 자료 처리 과정은 그림 4와 같다. 투영중심의 위치를 결정하기 위해서는 위성 신호의 주파수별 관측자료를 처리하여 매초 단위로 수신한 GPS 안테나의 위치를 구한 다음, 선형 보간법에 의하여 촬영 당시의 투영중심의 위치를 결정한다. 이 과정에서 결정된 투영중

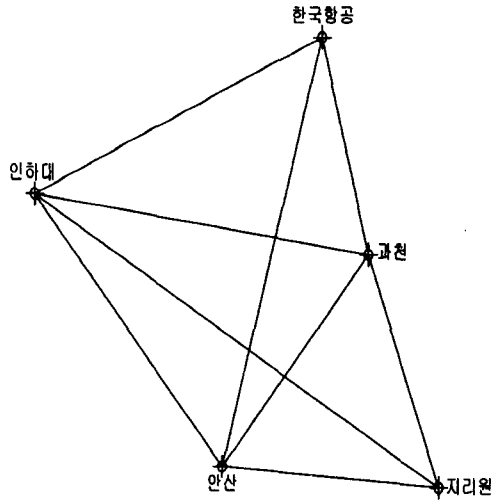


그림 3. GPS 자료 처리를 위한 기준망

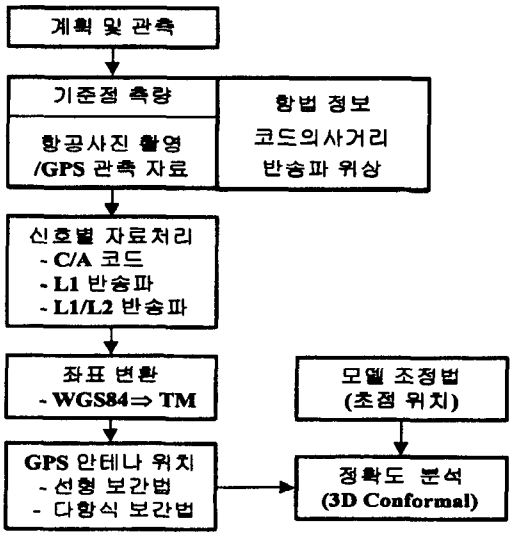


그림 4. GPS 자료 처리 과정

심의 좌표는 WGS84 좌표이므로 항공삼각측량에 사용하기 위해서는 TM 좌표로 변환하여야 한다. 좌표 변환은 기준점 측량에서 얻은 좌표를 이용하여 7개의 변환계수 방법을 사용하였다. 최종적으로 TM 좌표로 결정된 투영중심의 위치를 모델 조정법으로 조정된 투영중심의 좌표와 비교 분석함으로써 GPS 자료 처리에 대한 정확도를 점검하였다.

촬영 당시 수신한 GPS 자료는 Trimble사의 상용 프로그램인 GPSurvey (Version 2.30)를 사용하여 처리하였다. 항공기용 수신기와 기준국용 수신기가 서로 다르므로, 데이터 처리를 위해 수신기에 상관없이 데이터를 처리, 사용할 수 있도록 국제 측지위원회에서 GPS 표준 변환 형식으로 정한 RINEX(Receiver Independent Exchange Format)를 사용하여 항공기용 관측 자료를 변환하여 GPS 안테나의 위치를 결정하였다. 표 1에서 코스별 촬영 시간과 수신한 GPS 위성 갯수를 알 수 있다.

촬영 당시 1초 간격으로 수신한 반송파를 사용하여 정확한 투영중심의 위치를 결정하기 위해서는 먼저 모호정수를 결정해야 한다. 그러나, 항공 사진을 촬영할 때, 비행기가 한 코스에서 다른 코스로 비행하는 과정에서 회전 경사각(bank angle)으로 인해 위성의 신호단절(cycle slip)이 발생하였다. 코스를 이동할 때 GPS 자료 수신 상태를 관측한 결과 수평 고도각이 30도인 GPS 위성의 신호도 단절되는 현상이 나타났고, 신호 단절로부터의 회복은 L1 반송파는 사진 촬영 전에 회복되는데 반해 L2 반송파는 L1 반송파보다 회복이 느리게 되었다. 따라서, 미지정수는 모든 코스에서 L1 반송파에 의한 실수해(double float L1)로 결정되었으므로, GPS 안테나의 위치는 각 코스마다 고유한 편차를 가지게 된다.

**표 1. 코스별 촬영시간 및 수신 위성자료**

| 코스 | 시작시간 | 종료시간 | 인공위성 |
|---|---|---|---|
| 1 | 10:41:44 | 10:42:03 | 3, 17, 18, 22, 25, 31 |
| 2 | 10:45:24 | 10:46:59 | 3, 17, 18, 22, 25, 31 |
| 3 | 10:31:43 | 10:32:44 | 3, 18, 22, 25, 31 |
| 4 | 10:22:20 | 10:24:03 | 3, 18, 22, 25 |
| 5 | 10:36:03 | 10:38:06 | 3, 17, 18, 22, 25, 31 |
| 6 | 10:27:04 | 10:28:55 | 3, 18, 22, 25 |
| 7 | 10:18:32 | 10:20:00 | 3, 18, 22, 25 |
| 8 | 11:03:00 | 11:03:41 | 3, 18, 22, 25, 31 |
| 9 | 10:58:09 | 10:58:21 | 3, 18, 22, 25, 31 |

본 연구에서 항공 사진을 촬영할 때 GPS 수신기는 매초마다 위성 자료를 수신하였으므로 GPS 관측 자료를 처리한 결과를 이용하여 사진 촬영 순간의 GPS 안테나 위치를 결정해야 한다. 따라서 관측된 GPS 수신기의 위치와 촬영순간의 위치를 효과적으로 일치시키는 시각동기화가 이루어져야 한다. 촬영용 항공기에 장착된 시간기록장치(TDU)에서, 셔터를 누르면 항공사진 카메라에서 발생하는 전기신호(조리개가 열리는 시간의 중앙에서)를, GPS 수신기로부터 매 1초마다 출력되는 시간을 이용하여 $10^{-4}$초까지 카메라의 정확한 노출시간이 기록되므로 선형보간법으로 촬영 순간의 GPS 안테나의 위치를 결정하였다.

GPS를 결정한 안테나의 위치를 광속 조정법에 적용하기 위해서는 TM 좌표로 변환하여야 한다. 본 연구에서는 적용되는 기준점의 수와 배치상황에 따른 결과분석을 위해, 표 2와 같이 3가지 다른 방법을 사용하여 7개의 변환계수를 찾아내고 그 결과를 분석하였다. 각 작업별로 구해진 변환계수를 이용하여 계산된 좌표를 상호 비교한 거리오차는 2 cm 이내이므로 사용한 기준점의 거리와 수와 관계없이 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

### 2.4 정확도 분석

촬영 당시 1초 간격으로 수신한 GPS 자료를 처리하여 얻은 투영중심의 위치에 대한 정확도를 점검하기 위해서 현재 국내에서 사용하고 있는 모델 조정법으로 계산된 투영중심의 위치와 비교 분석하였다.

지상기준점 측량은 국립 지리원에서 설치한 1등 삼각점 및 수준점으로부터 GPS 및 수준의를 이용하여 수행하였고, GPS 자료 처리를 위한 기준국과 연결하였다. 지상기준점 측량 결과는 공공 측량 작업 규정에 의한 정확도인 평면, 수직 기준점의 표준편차 ±10 cm를 만족하였다. 평면 기준점은 블록의 외곽에 촬영진행 방향으로 2 모델 간격으로 촬영 방향과 직각으로는 코스가 중복되는 부분마다 1점씩 배치하였고, 수직 기준점은 모델당 4점

**표 2. GPS 좌표 변환 방법**

| 작업 | 기준점 | 기준점 |
|---|---|---|
| 1 | 4개 | 인하대, 한국항공, 안산, 광교산 |
| 2 | 4개 | 항공삼각측량을 위한 지상기준점 16점 중 외곽의 4점 |
| 3 | 16점 | 항공삼각측량을 위한 지상기준점 측량 16점 |

씩 배치하였다.

사진기준점 관측은 해석 도화기(P-2)로 입체 모델을 형성하여 수행하였고 모델 조정은 과대 오차를 자동으로 검출할 수 있는 PAT-MR을 사용하였다. 조정 결과는 표 3에서와 같이 기준점의 잔차, 평면 위치 및 표고에 있어서 표준 편차가 0.2‰Z(축척 1/5,000 항공 사진에서 ± 0.15 m)이내라고 규정한 공공 측량 작업 규정의 정확도를 만족한다.

GPS 관측 자료를 이용하여 결정한 카메라 투영중심 좌표를 항공삼각측량 자료로 이용가능한 지에 대한 타당성 검증을 위하여, 먼저 GPS의 위치좌표를 선형 보간한 결과에서 GPS 자료 관측에서 발생하는 정오차를 제거하였다. 이로부터 모델조정법에 의해 결정된 투영중심 좌표와 3차원 등각 사상 변환(3D conformal transformation)을 이용하여 편류(drift) 및 모호 정수에 의해 발생되는 오차를 제거하여 결과를 분석하였다.

그림 5는 과천 기준점으로 처리한 GPS 자료와 모델 조정법에 의해 결정한 투영중심 좌표를 3차원 등각 변환한 코스별 표준편차를 보여준다. C/A 코드만으로 처리한 결과는 코스별로 표준 편차가 1 m~5 m 정도로 1/5,000 항공 사진에 대한 항공삼각측량 자료로서 필요한 정확도

**표 3. 모델조정법 입력자료 및 조정결과**

| 입력자료 | 모델 | 사진기준점 | 평면 기준점 | 표고 기준점 |
|---|---|---|---|---|
| | 145 | 1758 | 50 | 171 |
| RMS 오차 | 사진기준점 | | 평면 | 0.031m |
| | | | 표고 | 0.045m |
| | 투영 중심 | | 평면 | 0.067m |
| | | | 표고 | 0.036m |
| | 지상기준점 | | 평면 | 0.065m |
| | | | 표고 | 0.053m |
| 표준편차 (Sigma Naught) | | | 수평 | 10.2 |
| | | | 표고 | 14.2 |

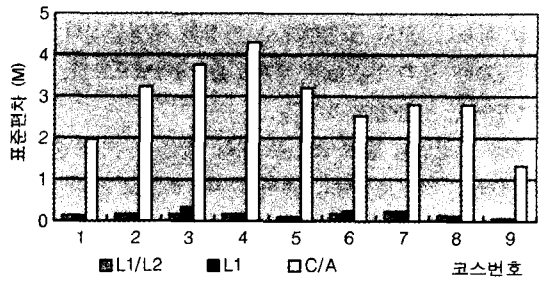



**그림 5. 위성신호별 오차 분석(과천)**

를 만족시키지 못하므로 사용할 수 없다. 그러나, C/A 코드는 GPS 위성에서 송신하는 궤도 정보를 이용하여 항공기의 위치를 결정하므로, 지상에 설치된 기준국과 무선으로 연계한 실시간 DGPS 방식으로 운영할 경우 항공사진을 촬영할 때 매우 정확한 항로를 유지할 수 있다.

표 4는 항공기와 기준국과의 거리 및 자료 처리에 사용한 GPS 주파수에 따른 정확도를 비교한 것이다. 과천 기준국은 촬영 대상 지역의 가운데에 있고, 인하대학교 기준국은 대상 지역에서 약 30 km 가량 떨어져 있다. 표에서 알 수 있듯이 L1과 L2 반송파를 모두 이용하고 가장 가까운 기준국을 사용하여 투영중심의 좌표를 구하는 것이 가장 정밀한 방법이다. 그러나, 3코스의 과천 L1 주파수를 사용하여 계산한 자료를 제외하면, L1 주파수만 사용하여 투영중심의 위치를 결정한 경우의 오차도 L1/L2 주파수를 동시에 사용한 경우와 대부분 1~2 cm 정도의 차이를 보여 동일한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 거리가 다른 두 기준점으로 결정한 자료의 오차도 거의 유사한 결과를 보여 기준점으로부터의 거리가 30 km까지는 거의 동일한 결과가 나옴을 알 수 있다.

따라서, L2는 신호단절이 되면 회복되는 시간이 느리

**표 4. 기준국 및 사용 주파수별 오차 (RMS : m)**

| 기준국 | 코스 | L1/L2 | | | | L1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | SX | SY | SZ | 거리 | SX | SY | SZ | 거리 |
| 과천 | 1 | 0.114 | 0.068 | 0.034 | 0.137 | 0.114 | 0.068 | 0.034 | 0.137 |
| | 2 | 0.061 | 0.123 | 0.064 | 0.151 | 0.073 | 0.145 | 0.066 | 0.174 |
| | 3 | 0.074 | 0.108 | 0.078 | 0.152 | 0.199 | 0.177 | 0.206 | 0.337 |
| | 4 | 0.103 | 0.095 | 0.079 | 0.161 | 0.095 | 0.103 | 0.079 | 0.161 |
| | 5 | 0.079 | 0.062 | 0.046 | 0.110 | 0.077 | 0.061 | 0.041 | 0.107 |
| | 6 | 0.089 | 0.126 | 0.064 | 0.167 | 0.156 | 0.139 | 0.059 | 0.217 |
| | 7 | 0.124 | 0.143 | 0.125 | 0.227 | 0.124 | 0.143 | 0.124 | 0.225 |
| | 8 | 0.099 | 0.077 | 0.072 | 0.145 | 0.099 | 0.077 | 0.072 | 0.144 |
| | 9 | 0.042 | 0.062 | 0.020 | 0.077 | 0.043 | 0.062 | 0.020 | 0.078 |
| | 평균 | | | | 0.147 | | | | 0.176 |
| 인하 | 1 | 0.114 | 0.068 | 0.035 | 0.137 | 0.113 | 0.068 | 0.034 | 0.136 |
| | 2 | 0.080 | 0.142 | 0.067 | 0.176 | 0.079 | 0.182 | 0.066 | 0.209 |
| | 3 | 0.102 | 0.081 | 0.085 | 0.155 | 0.153 | 0.118 | 0.093 | 0.214 |
| | 4 | 0.103 | 0.095 | 0.079 | 0.161 | 0.095 | 0.103 | 0.079 | 0.161 |
| | 5 | 0.077 | 0.060 | 0.041 | 0.106 | 0.079 | 0.080 | 0.068 | 0.132 |
| | 6 | 0.146 | 0.137 | 0.059 | 0.209 | 0.157 | 0.139 | 0.058 | 0.218 |
| | 7 | 0.154 | 0.148 | 0.105 | 0.238 | 0.120 | 0.119 | 0.106 | 0.200 |
| | 8 | 0.098 | 0.077 | 0.072 | 0.144 | 0.099 | 0.076 | 0.072 | 0.144 |
| | 9 | 0.043 | 0.061 | 0.020 | 0.077 | 0.043 | 0.061 | 0.020 | 0.077 |
| | 평균 | | | | 0.156 | | | | 0.166 |

기 때문에 코스 진입 후 초기에 촬영하는 사진에 대한 GPS 관측 자료를 수신하지 못하는 경우가 발생한다. 그러므로, 기준국과의 거리가 가까운 경우에는 L1 주파수만을 이용하여 투영중심의 위치를 결정하여도 항공삼각측량 자료로 충분한 정확도를 얻을 수 있다.

## 3. GPS 항공삼각측량

### 3.1 자료 준비 및 관측

본 연구에서 사용한 항공사진은 과천시 수치지도 갱신을 위해 촬영한 사진으로 촬영 지역에는 과천 시가지를 포함하여 관악산을 비롯한 근교의 산지가 포함되어 있었다. 또한, 촬영 당시 항공삼각측량을 위한 대공표시를 설치하지 않았으므로, 입체 모델로 관측할 경우에는 양호했지만 광속 조정을 위해 사진 좌표를 관측할 때 산지에 있는 자연 지물을 이용한 지상기준점을 관측하기 곤란한 경우가 많이 발생하였다. 따라서 정확한 지상기준점에 대한 사진 좌표 관측을 위해서는 대상 지역에서 지형지물을 이용하여 지상기준점을 명확하게 식별할 수 있는 과천 시가지 부분을 선택하였다. 총 65매의 사진에서 980개의 사진기준점을 해석 도화기(Zeiss P-2)로 관측하였고, 이를 Affine 변환에 의하여 사진 좌표로 변환한 결과 평균제곱근 오차는 ±9.5 μm이었다.

대상 지역을 선정함에 따라 공공측량 작업 규정에 의해 블록의 외곽에 필요한 16개의 평면 기준점(X, Y)을 선정하였다. 선정된 평면 기준점은 기존의 GPS 측량망과 연결하여 측지측량용 GPS 수신기(Trimble 4000SSI)로 각 점마다 30분 이상 GPS 자료를 관측하여 GPSurvey (Version 2.3, Trimble)로 처리하였다. 표고 기준점은 전체 지역에 대해 실시한 수준 측량 자료를 사용하였다.

### 3.2 광속 조정법 수행

광속 조정법은 기준점 배치에 따른 정확도, GPS 관측시 항공기와 기준국과의 거리에 따른 정확도를 점검하기 위해 다양한 방법으로 수행하였다.

기준점 배치 방법에 따른 정확도를 점검하기 위해서 표 5와 같이 9가지 방법으로 광속 조정법을 수행하였다. 방법 1은 사진 좌표를 관측할 때 발생한 우연 오차를 제거하기 위해서 모델조정법으로 조정된 좌표와 새로 측량한 지상기준점을 모두 지상기준점으로 사용하여 광속 조정법을 수행하였다. 2~9번까지의 방법은 인접 사진

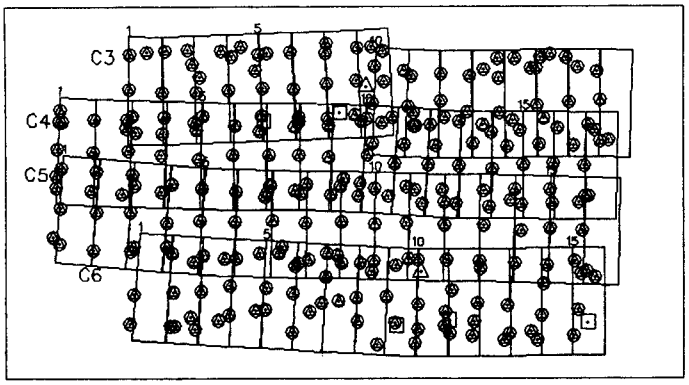
**표 5.기준점 배치 방법별 기준점 및 자유도**

| 방법 | 기준점의 수 | | | | 자유도 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | XYZ | XY | Z | 계 | 기존 방법 | GPS |
| 1 | 255 | 2 | 5 | 263 | 1540 | 1735 |
| 2 | 16 | 10 | 74 | 102 | 910 | 1105 |
| 3 | 16 | 10 | 32 | 58 | 869 | 1064 |
| 4 | 6 | 7 | 10 | 23 | 811 | 1006 |
| 5 | 8 | 3 | 7 | 18 | 806 | 1001 |
| 6 | 4 | 4 | 4 | 12 | 793 | 988 |
| 7 | 4 | 2 | 2 | 8 | 787 | 982 |
| 8 | 3 | 1 | 7 | 11 | 787 | 982 |
| 9 | 3 | 1 | 1 | 5 | 781 | 976 |

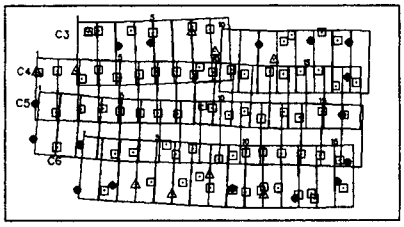
2매의 투영중심 사이의 거리, 즉, 기선 거리(air base)에 비례하도록 기준점 간격을 넓히면서 기준점 배치에 따른 정확도를 비교하였는데, 자세한 기준점 배치 방법은 그림 6과 같다.

GPS로 투영중심의 위치를 결정하여 사용할 경우의 정확도에 대한 점검을 위해서 다시 3가지 방법으로 광속 조정법을 수행하였다. 첫 번째 방법은 비교 기준으로 사용하기 위해서 GPS 자료를 사용하지 않고 지상기준점만을 사용하여 광속 조정법을 수행하였다. 두 번째 방법은 항공 사진을 촬영할 때 대상 지역의 중심인 과천에 설치한 GPS 기준국으로 결정한 좌표를 사용하였다. 마지막 방법은 촬영 지역에서 약 30 km 떨어진 인하대에 설치한 GPS 기준국으로 결정한 좌표를 사용하였다. 또한, 사용 주파수별 정확도 분석을 위해 과천 기준국으로 결정한 자료는 L1과 L2 주파수를 사용하였고, 인하대 기준국으로 결정한 자료는 L1 주파수만 사용하였다. 이와 같이 기준국 및 사용 주파수에 따른 3가지 방법에 지상기준점 배치에 따른 9가지 방법을 각각 점검함으로써 기선거리 및 사용 주파수에 따른 정확도와 지상기준점 배치에 따른 정확도를 동시에 점검할 수 있었다. GPS 자료의 관측과 처리에서도 언급한 바와 같이 C/A 코드로 결정한 좌표는, 모델 조정법으로 결정한 투영중심의 위치와 비교한 결과 1~5 m의 정확도를 나타냈으므로, 광속 조정법에는 사용하지 않았다.

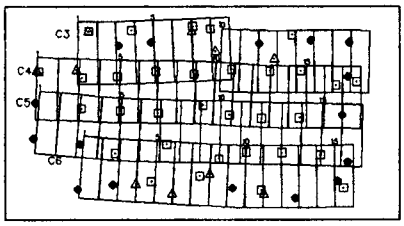
광속 조정법의 종료 조건은 반복 계산 회수, 표준편차의 변화율, 최대보정량을 동시에 사용하였고, 정확한 조정 결과를 얻기 위해 최대 보정량이 1 mm보다 작을 경우에 종료하도록 반복 계산 회수 및 표준 편차의 변화율 조건을 조정하였다.



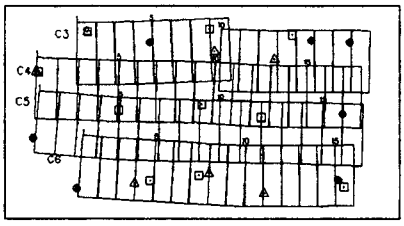

(방법 1) 광속 조정법을 위한 사진 기준점 배치



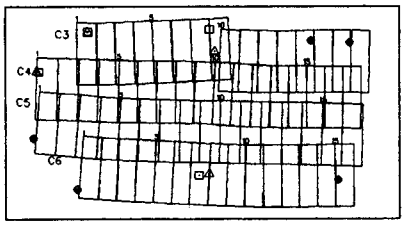
(방법 2) 평면 : 기선 x 2, 높이 : 모델당 4점



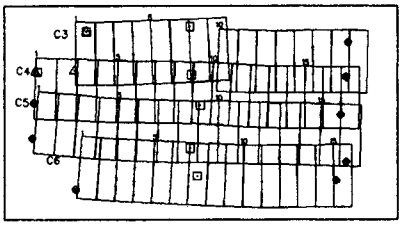
(방법 3) 평면 및 높이 : 기선 x 2



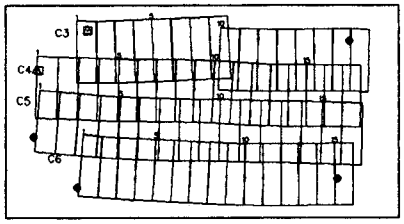
(방법 4) 평면 및 높이 : 기선 x 4



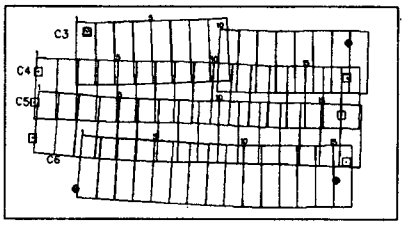
(방법 5) 평면 : 코스의 끝, 높이 : 코스의 끝/중간



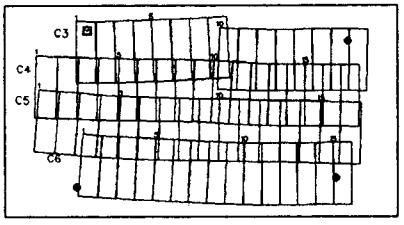
(방법 6) 평면 및 높이 : 기선 거리 x 8



(방법 7) 평면 및 높이 : 기선 거리 x 16



(방법 8) 평면 : 블록의 코너, 높이 : 코스의 끝



(방법 9) 평면 및 높이 : 블록의 코너

**그림 6. 기준점 배치 방법**

### 3.3 지상기준점을 이용한 광속 조정 결과

지상기준점만을 사용하여 조정한 결과에서는 기준점의 수가 감소할수록 정확도가 떨어지는데, 그림 7에서 알 수 있듯이 높이 기준점의 감소에 따른 오차가 평면 기준점 감소에 따른 오차보다 급하게 증가한다는 점이다. 특히 6번 방법부터 오차가 급격하게 증가하는 현상을 나타내는데, 7, 8 9번 방법은 각각 6, 10, 4개의 높이 기준점을 배치하였지만 거의 유사한 정확도를 나타내고 있다. 이로부터 광속 조정에 있어서 높이 기준점의 간격이 멀어지면 기준점의 수나 배치 방법에 관계없이 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

평면 오차에서는 주목할 것은 5번 방법과 6번 방법이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 5번 방법은 11개의 평면 기준점을 각 코스의 끝에 배치하였고, 6번 방법에서는 11개의 평면 기준점과 15개의 높이 기준점을 기선 거리의 8배가 되도록 고르게 배치하였다. 그러나, 그림 7에서 보면 6번 방법이 5번 방법보다 적은 수의 기준점이지만 블록 전체에 고르게 배치된 것을 알 수 있다. 따라서, 광속 조정에 있어서 평면 위치의 정확도를 향상시키기 위해서는 평면 기준점을 블록 외곽에 고르게 배치하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

### 3.4 GPS 자료를 이용한 광속 조정 결과

항공 사진을 촬영할 때 기상 요인으로 인해 카메라의 회전인자를 조정하는 경우, 1개 코스에서 발생하는 항공사진 카메라와 GPS 안테나의 편심 벡터는 일정하지 않게 된다. 광속 조정 과정에서 GPS 수신 자료를 사용하여 투영중심의 위치를 결정하기 위해 3차원 등각 사상 변환에 편심 벡터를 적용한 식을 사용하였지만, 편심 벡터는 거의 0에 가까운 값으로 나타났다. 투영중심 좌표의 가중값은 광속 조정 초기값으로 표준 편차 100 m를 적용하였고, 조정 과정에서는 광속 조정에 의해 결정된 투영중심의 좌표를 GPS 좌표로 변환하는 과정에서 계산된 표준 편차를 적용하였다.

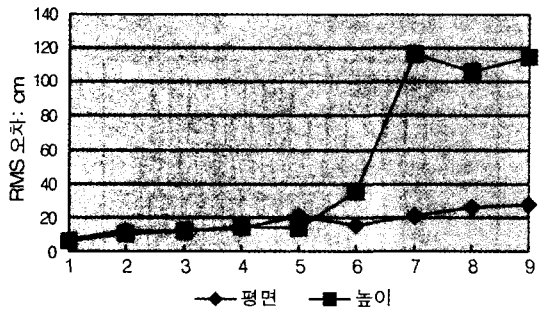



**그림 7. 지상기준점을 이용한 광속 조정 오차**

$$\begin{bmatrix} X_{GPS}^{AT} \\ Y_{GPS}^{AT} \\ Z_{GPS}^{AT} \end{bmatrix} = S \cdot R_{GPS}^{AT} \left[ R^{AT} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{PC} \\ Y_{PC} \\ Z_{PC} \end{pmatrix} \right] + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}$$

$\left[X_{GPS}^{AT}\ Y_{GPS}^{AT}\ Z_{GPS}^{AT}\right]^T$ : 코스별 GPS안테나의 위치

S : 축척 계수

$R_{GPS}^{AT}$ : 코스별 회전 행렬(편류)

$R^{AT}$ : 항공사진의 회전행렬

$[\Delta X\ \Delta Y\ \Delta Z]^T$ : 편심벡터

$[X_{PC}\ Y_{PC}\ Z_{PC}]^T$ : 카메라의 투영중심 좌표

$[X_{GPS}\ Y_{GPS}\ Z_{GPS}]^T$ : 코스별 GPS안테나의 위치

$[T_X\ T_Y\ T_Z]^T$ : 선형 변위 보정량

광속 조정 결과 산출된 표 6의 GPS 투영중심의 위치 오차에서 평면(XY) 오차가 높이(Z) 오차보다 매우 큰 경향을 알 수 있다. 이는, 항공기에 GPS 안테나가 카메라의 중심에 거의 수직으로 설치되었음을 고려할 때, 촬영할 때 회전 인자를 조정하면 편심 벡터가 수평으로 나타나는 현상으로 인하여 항공 사진 카메라와 GPS 안테나의 편심 벡터가 부정 오차로 포함되었음을 알 수 있다.

GPS 자료를 이용한 광속 조정 결과는 그림 8과 그림 9에서 알 수 있듯이 기준점의 감소에 따라 평면(XY) 오차 및 높이(Z) 오차의 증가가 거의 없다는 점이다. 모델

**표 6. 광속조정법에 의한 투영중심의 위치 오차**

(과천 L1, L2 주파수, RMS : mm)

| 방법 | X | Y | 평면 | 높이 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 106 | 114 | 156 | 50 |
| 2 | 109 | 107 | 153 | 50 |
| 3 | 109 | 108 | 153 | 51 |
| 4 | 110 | 106 | 153 | 50 |
| 5 | 108 | 106 | 151 | 51 |
| 6 | 110 | 106 | 153 | 50 |
| 7 | 109 | 105 | 151 | 51 |
| 8 | 109 | 105 | 151 | 51 |
| 9 | 109 | 105 | 151 | 51 |

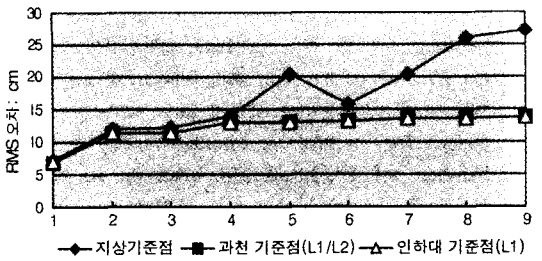



그림 8. 광속 조정 평면(XY) 오차

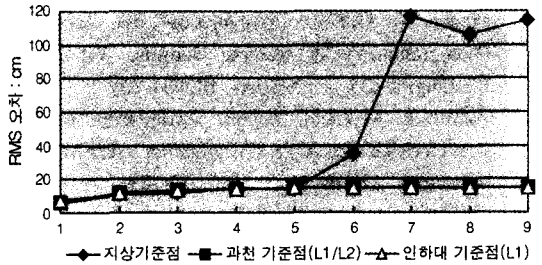



그림 9. 광속 조정 높이(Z) 오차

조정법에서 조정 계산된 사진기준점 좌표 및 지상기준점의 좌표를 모두 지상기준점으로 사용하여 광속 조정법을 실행하였을 때에는, GPS 자료를 사용하는 경우나 사용하지 않는 경우나 거의 동일한 결과가 나타난다. 그러나, 지상기준점만을 사용한 경우에는 기준점의 수의 감소에 따라, 정확도가 급격하게 감소하는데 반해, GPS 자료를 사용하는 경우에는 정확도가 매우 완만하게 감소한다. 또한, 표 6에서 GPS에 의해 결정된 투영중심의 위치 오차에서 지상기준점의 수가 감소하더라도 평면 및 높이 오차는 거의 일정한 정확도를 유지하는 경향을 보인다. 이로부터 GPS로 결정한 투영중심의 좌표가 매우 안정적이고 정확함을 알 수 있다.

촬영 지역에서 약 30 km 떨어진 인하대에서 수신한 L1 주파수를 이용하여 처리한 자료의 정확도도 촬영 지역의 중앙인 과천에서 수신한 L1, L2 주파수를 이용하여 처리한 자료의 정확도와 거의 동일하다는 점에서 기선 거리 30 km 이내에서 수신한 GPS 자료는 어느 주파수를 사용하나 똑같은 정확도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는, 표 4의 기준국 및 사용 주파수별 오차 비교에서 알 수 있듯이 과천 기준국에서 수신한 L1, L2 주파수를 처리한 결과와 인하대 기준국에서 수신한 L1 주파수를 처리한 결과가 거의 동일한 결과에서도 충분히 예상했던 결과이다. 또한, 표 4에서 보면 1, 4, 8, 9 코스의 X, Y, Z 및 거리 오차를 비교해 보면 과천 기준국의 L1, L2 주파수로 처리한 결과와 인하대 기준국의 L1 주파수로 처리한 결과가 거의 동일하게 나타난 점에서 두 자료가 각 코스별로 모호 정수에 따른 좌표의 변위만 발생함을 알 수 있다. 이는 두 자료를 코스별로 3차원 등각 사상 변환을 수행한 결과, 축척 및 회전 요소는 0에 가깝고 평행 이동 성분만 발생하는 점에서도 알 수 있었다.

따라서, 코스를 바꿀 때 항공기의 회전 경사각으로 발생하는 GPS 위성의 신호 단절(cycle slip)에서 회복이 느린 L2 주파수가 코스의 진입 부분에서 촬영된 사진에서 수신이 되지 않은 경우에는, 기준국과 항공기의 기선 거리가 짧을 때에는 L1 주파수만을 사용하여 투영중심의 좌표를 결정하여 광속 조정법에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 항공 사진을 촬영할 때 수신한 GPS 자료를 처리함으로써 카메라 투영중심의 좌표를 결정하여 모델 조정법으로 결정된 카메라 투영중심의 위치와 3차원 등각 사상 변환을 통하여 GPS 자료 정확도를 검증하였다. 또한, 최종적으로 처리한 GPS 자료를 기준점 배치, 기준국의 위치 및 사용 주파수에 따른 광속 조정을 수행하여 정확도를 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 항공기가 코스를 변경할 때 회전 경사각으로 발생하는 GPS 신호 단절(cycle slip)의 영향으로 코스마다 새로운 모호 정수를 결정해야 하므로, 광속 조정법을 수행할 때 각각의 코스마다 변환 계수를 사용해야 한다.

둘째, C/A 코드를 사용하여 모델조정에 의해 결정된 투영중심의 위치와 비교해 본 결과, 약 1-5 m 정도의 정확도를 얻을 수 있었다. 따라서 C/A 코드를 항공 삼각측량에 사용할 수 없지만, 촬영 임무를 위해서 지상 기준국과 무선 연결을 통한 실시간 DGPS 방식으로 운영할 때 정확한 항로를 유지하기 위해 사용할 수 있다.

셋째, 3차원 등각 사상 변환으로 선형 변이과 편류(drift)에 의한 오차를 보정한 경우, 거리 30 km 이내에서는 사용 주파수에 관계없이 약 14 cm 정도의 오차를 가지고 투영중심의 위치를 결정할 수 있다.

넷째, GPS 자료로 결정한 투영중심의 위치를 광속 조

정법에 적용하는 경우, 기상 조건으로 회전인자를 조정하여 카메라와 GPS 안테나의 편심 오차를 고려하지 않더라도 충분한 정확도를 얻을 수 있다. 그러나, 촬영중의 회전 인자를 저장하여 광속 조정 자료로 사용할 경우에는 정확도를 높일 수 있을 것이다.

다섯째, 짧은 기선 거리에서 수신한 GPS 자료로 결정한 투영중심의 위치를 광속 조정법에 적용하는 경우 4개의 기준점(XYZ)만으로도 공공측량작업규정을 만족하는 정확도를 얻을 수 있다.

여섯째, 4개의 기준점만 사용하는 경우 지상 측량 및 사진 관측 과정에서의 오류를 방지하기 위해서 블록 코너마다 2점씩 지상기준점을 관측하는 것이 바람직할 것이다. 또한, 블록의 코너 부분이 산지와 같이 기준점을 관측하기 어려운 경우에는 반드시 대공 표지를 설치하여야 한다.

마지막으로 본 논문에서 사용한 최대 기선 거리는 30 km 정도이므로 기준국과의 거리가 미치는 영향을 정확하게 분석하기 위해서는 보다 원거리의 기준국 자료를 사용한 분석이 이루어져야 한다. 이는 항공 사진 촬영 지역이 비행장으로부터 멀리 떨어진 경우 기상 조건으로 인해 작업 인원이 직접 기준국을 설치하는데 필요한 이동 및 대기 시간을 절감할 수 있는 항공기용 GPS 운용에 중요한 판단 요소를 제공하게 될 것이다. 그리고, 앞으로 설치될 GPS 상시 관측소가 설치되어 운용될 때 촬영 대상 지역에 지상 기준국을 설치해야 하는 지를 결정할 때 많은 도움이 될 것이다.

## 참고문헌


1. Counselman, C.C., and S.A Gourevitch, "Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying: Ambiguity and Multipath with Global Positioning System", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-19, No. 4, 1981, 244-252.
2. Remondi, B.W, "Performing Centimeter-Level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initial Results", Navigation, Jouranl of The Institute of Navigation, Vol. 32, No. 4, 1985, 386-400.
3. James R, Lucas, "Aerotriangulation without Ground Control", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, No. 3, March 1987, 311-314.
4. Jan Willem van der Vegt, Dirk Boswinkel and Richard Witmer, "Utilisation of GPS in large scale photogrammetry", Int. Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 27, B8, Kyoto, 1988, pp. III 413-429.
5. P. Frie β, "Empirical Accuracy of Positions Computed from Airborne GPS data", Int. Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 27, B8, Kyoto, 1988, pp. III 215-224.
6. F. Ackermann, "Operational Rules and Accuracy Models for GPS-Aerotriangulation", Int. Archives of *Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol 29, B3, Washington D.C., 1992, pp. III 691-700.
7. Qassim A. Abdullah, "Control requirements for single strip block airborne GPS Triangulation", ACSM/ASPRS Volume 2, APRIL 7-10, 1997, 220-238.
8. Clyde C. Goad and Ming Yang, "A New Approach to Precision Airborne GPS Positioning for Photogrammetry", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 9, September 1997, 1067-1077.
9. 박운용, 강준묵, 이재원, "GPS-인공위성 보조에 의한 소규모 지역의 항공삼각측량" 대한 토목학회논문집, 제15권, 제10호, 1995, 1731-1742
10. 배태석, "GPS 데이터를 이용한 항공삼각측량 최소 기준점수 결정에 관한 연구", 서울대학교 대학원토목공학과 석사 1996.
11. 임상성, 김충평, 노현호, "GPS 항공삼각측량의 정확도 분석", 한국측지학회지, 제 16권 제 2호, 1998, 195-202.
12. F.J.G. Boon, P.J de Jonge & C.C.J.M. Tiberius (1997), "*Precise aircraft positioning by fast ambiguity resolution* using improved troposphere modeling", ION GPS-97 Part 2 of 2 September 16-19 1997, 1877-1884.
13. American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, "Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry", 1996.
14. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins (1997), GPS Positioning System; Theory and Practice, Springer-Verlag, Fourth revised edition.
15. Leick, A. (1995), GPS Satellite Surveying, John Eiley & Sons, Second ed.
16. American Society of Photogrammetry, "Manual of Photogrammetry", Fourth Edition, 1980.