

사진축척을 고려한 GPS/INS 항공사진측량 블록조정 정확도 분석

Accuracy Analysis of Combined Block Adjustment with GPS/INS Observations Considering Photo Scale

이재원¹⁾

Lee, Jae One

Abstract

More than ten years after the era of GPS-Photogrammetry which could provide us only three projection center of all six exterior orientation parameters, direct georeferencing with GPS/INS is now becoming a standard method for image orientation. Its main advantage is to skip or reduce the indirect ground control process. This paper describes the experimental test results of integrated sensor orientation with a commercial GPS/IMU system to approve its performance in determination of exterior orientation. For this purpose two different imaging blocks were planned and the area was photographed at a large photo scale of 1:5,000 and a medium photo scale of 1:20,000. From these data set a variety of meaningful results was acquired, i.e., the accuracy potential of exterior orientation from direct georeferencing and combined block adjustment using these data considering different photo scales and conditions.

Keywords : GPS/INS, EO parameters, Direct Georeferencing, Block adjustment, Photo scale

요 지

현재 Direct Georeferencing은 지난 10여년 적용되어오던 GPS-항측의 단점인 항공사진의 6개 외부표정요소 중 단지 투영중심의 위치만 제공하던 약점을 극복하고 실무에 보편적으로 적용되고 있는 실정이다. 이의 가장 큰 장점은 지상기준점 측량작업의 절감내지는 이를 완전히 생략할 수 있다는 점이다. 본 논문은 상용의 GPS/IMU를 이용하여 외부표정요소 결정에 대한 실험 결과를 소개하였다. 실험을 위하여 사진축척 1:5,000의 대축척과 1:20,000의 중축척으로 촬영한 관측자료를 처리하여 사진축척의 변화를 고려한 외부표정요소 결정의 정확도 및 결합블럭조정의 특성 등 다양하고 의미 있는 결과들을 도출하였다.

핵심용어 : GPS/INS, 외부표정요소, 외부표정요소 직접결정, 블럭조정, 사진축척

1. 서 론

항공사진측량에 의하여 위치결정, 지도제작 및 기타 정량적 지형정보를 취득하기 위해서는 우선 촬영당시 지상의 기하상태를 사진이나 영상을 이용하여 도화기상에서 재현해야만 한다. 이를 위해서는 항공사진의 외부표정요소를 정확히 결정하는 작업이 필요하다. 과거 외부표정요소 결정은 주로 지상기준점을 이용하여 간접적으로 구하

거나 항공기에 다양한 기계장치를 보조 장비로 탑재하여 카메라의 외부표정요소를 구하였다. 지상기준점을 설치하는 경우에는 경비와 시간의 문제가 뒤따르며, 보조 장치의 이용은 정확도가 낮아 실용화하기에 한계가 있었다(Ackerman, 1986).

한편, 1980년대 후반 동적 GPS기술의 실용화로 사진촬영시 카메라의 노출과 동시에 GPS신호를 수신하여 투영중심의 위치좌표를 결정함으로써 지상기준점의 수를 어

1) 정회원 · 대한측량협회 측량정보기술연구원 연구위원(E-mail:jolee@kasm.or.kr)

는 정도 감소시킬 수 있게 되었다(이종출 등, 1997 ; 김충평, 2000). 그러나 GPS단독으로는 외부표정요소 중 세 회전각을 결정할 수 없으며, 동적GPS의 특성으로 말미암아 이를 블럭조정에 이용하는 경우 오차의 완전한 소거가 수학적으로 해결 불가능하여 블럭조정의 정확도가 낮아지게 된다(Jacobsen, 1991). 따라서 이를 해결하기 위해 GPS/INS통합에 의한 “Direct Georeferencing”기술에 대한 연구개발이 보편화되고 있다(Kruck, 2001). 최근 국내에서도 이에 대한 활발한 연구와 함께 현장적용을 위한 기술개발이 부분적으로 이루어지고 있다(국립지리원, 2002 ; 한상득 등, 2004). 또한, “Direct Georeferencing”기술은 현재 국내에 도입중인 항공 LIDAR측량(김형태, 2001), 향후 도입될 디지털 항공카메라 등의 실용화에 필요한 기반기술로서 그 중요성이 점점 더 커지고 있다. 아울러 GPS/IMU에 의한 외부표정자료를 이용하여 경제적이며 효율적으로 수치정사사진과 DEM 등을 제작 가능하다. 따라서 최적의 GPS/INS항측을 위한 비행고도와 지상 DGPS기준국의 기선거리의 변화 등 다양한 촬영조건에 대한 심층연구가 필요한 시점이다. 본 연구에서는 사진축척 1:5,000과 1:20,000으로 촬영한 자료를 처리하여 사진축척의 변화를 고려한 GPS/INS에 의한 외부표정요소 결정의 정확도 및 결합블럭조정의 특성 등 다양하고 의미 있는 결과들을 소개하였다.

2. GPS/INS 결합블럭조정의 원리

2.1 GPS/INS 항측의 원리

GPS/INS 항공사진측량이란 항측기에 GPS/INS를 탑재하여 항공사진의 외부표정요소를 직접 결정하는 방법으로 “Direct Georeferencing”의 일종이다(염재홍, 2001). 이의 기본개념은 두 센서의 장점을 극대화하고 단점을 소거하는 시너지효과를 이용하는 데 있다. 즉, 동적으로 결정된 GPS의 위치를 IMU에서 제공하는 위치정보와 회전각과 연계하여 센싱당시 탑재기의 정밀한 3차원 위치와 자세를 결정하는 수학적 알고리즘을 기반으로 하고 있다. GPS와 INS 관측자료의 통합처리를 위해서는 두 관측데이터를 최적으로 연결시켜주는 필터기법을 이용하는 특별한 추정방법인 Kalman Filter기법이 주로 이용되고 있다(Jaconc, 1996). Kalman Filter를 사용하면 GPS와 IMU의 동적오차를 모델링하고 두 관측값을 연계하여 이동중인 물체에 대한 순간위치와 방향을 연속적으로 측정할 수 있다.

2.2 GPS/INS 항측의 수학적 모델

항측기에 탑재한 GPS, IMU 및 카메라는 물리적으로 이들의 중심을 완전히 일치시켜 설치가 불가능하므로 상호간의 위치적 편심과 자세각의 이동량, 즉 초기정렬오차(Misalignment)가 발생한다. 따라서 GPS/INS 항측의 전제조건은 먼저 좌표계의 통합, GPS, INS 관측과 카메라 노출시각의 동기화 및 안테나와 카메라의 편심벡터를 결정 후 일반적인 공선조건식을 확장한 GPS-항측의 수학적 모델을 응용한다. 본 연구에서는 BINGO-F 프로그램으로 결합블럭 조정을 수행하였으며, 이에 대한 수학적 알고리즘은 간단히 설명하면 다음과 같다. IMU에 의하여 측정된 사진의 회전각과 사진의 실제 회전각과의 관계를 나타내면 식 (1)과 같다(Kruck, 2001). 식 (1)에서 G 는 Ground, I 는 Instrument, P 는 Photo를 각각 의미한다.

$$R_G^I = R_G^P \cdot R_P^I \quad (1)$$

R_G^I 는 지상에서 장비좌표계(IMU의 Φ, Ω, K)로의 회전행렬을, R_G^P 는 지상에서 사진좌표계(ψ, ω, κ)로의 회전행렬을 나타낸다. 그리고 R_P^I 는 사진좌표계에서 장비좌표계로의 회전행렬로서 상수이다. 즉, 정렬오차의 보정각인 $d\psi, d\omega, d\kappa$ 에 해당한다. 식 (1)에서 회전은 ψ, ω, κ 의 순서로 진행되며, IMU에 의하여 측정된 회전각(Φ, Ω, K)의 보정을 위해서는 초기치와 각각의 편미분을 이용하여 식 (2)의 관측방정식에 의하여 반복 조정을 실시한다.

$$\begin{aligned} \Phi + v\Phi &= f(\psi, \omega, \kappa, d\psi, d\omega, d\kappa) \\ \Omega + v\Omega &= f(\psi, \omega, \kappa, d\psi, d\omega, d\kappa) \\ K + vK &= f(\psi, \omega, \kappa, d\psi, d\omega, d\kappa) \end{aligned} \quad (2)$$

GPS/INS 결합블럭 조정의 수학적 모델에 대한 완전한 표현은 다양한 문헌들에서 자세히 설명하고 있다(Kruck, 1996 ; Alamus, 2001 ; Skaloud et al., 1996).

GPS/INS 데이터를 블럭조정에 부가의 관측값으로 도입하면 지상기준점의 수를 크게 감소시킬 수 있는 반면, 다른 한편으로는 GPS/INS의 동적인 관측특성으로부터 야기되는 여러 가지 문제로 인하여 블럭에 다양한 오차가 발생한다. 따라서 성공적인 표정작업을 위해서는 영상좌표에서 지상좌표로 변환하는데 관계되는 모든 인자들, 특히 IMU의 정렬오차(Boresight misalignment)를 정확하게 결정해야만 한다.

3. 관측실험 및 자료처리

3.1 GPS/INS 항공사진촬영

본 연구의 실험지역은 과천일원 약 20km²와 수원일대 약 650km²에 대하여 각각 사진축척 1:5,000과 1:20,000으로 촬영하였으며 산악지와 도심지가 혼재되어 있다(그림 1 참조). 두지역 모두 촬영용 항공기는 Cessna 208, 항공 카메라는 RC30($f=152.486\text{mm}$)이며, GPS/IMU 장비는 캐나다 Applanix사의 POS/AV 시스템을 사용하였으며, 기타 실험지역에 대한 축척별 촬영일자, 사진매수, 중복도, 지상기준점 정확도 및 투영중심의 정확도 등 촬영 파라메타는 표 1에 수록하였다.

촬영시 지상의 DGPS 기준국은 블러내의 한 점과 이로

부터 약 200km와 320km 정도 떨어진 대구 및 부산에도 기준국을 설치하였다. 모든 기준국의 GPS 수신간격은 카메라의 노출순간의 위치결정이 가능하도록 항공측기에 부착된 GPS 수신기의 수신간격과 동일한 1초로 하였다. 촬영시 스트립의 평균길이는 과천지역은 약 8km이고, 수원지역은 약 24km이다. 양 지역의 촬영시 지상과 항공측기에서 모두 6개 이상의 위성수신이 가능하였으며, 항공측기에서 수신한 위성의 PDOP이 과천지역의 경우에는 4이하이고, 수원지역에서는 6이하로 과천지역의 경우가 약간 양호한 상태이다.

지상기준점 측량은 국토지리정보원의 “항공사진측량 작업내규”에 준하여 GPS 측량으로 실시하였다. 사진기준점측량(AT) 방식으로 선점시 평면점을 2모델당 1점씩 선

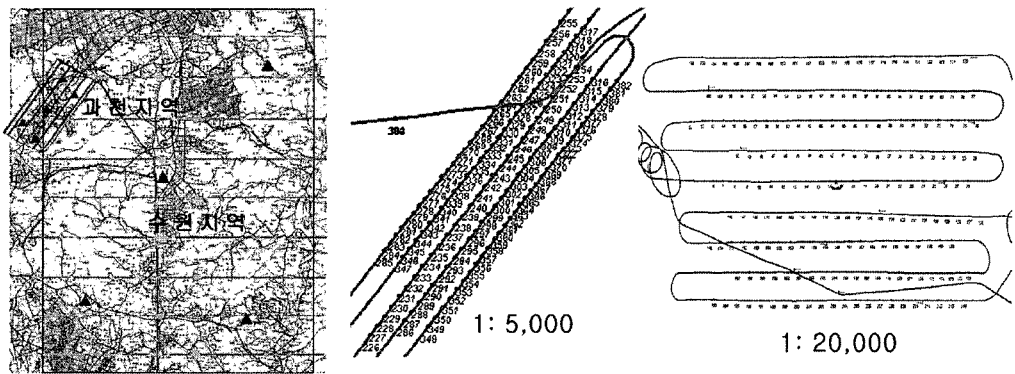


그림 1. 촬영대상지역 및 축척별 비행 스트립

표 1. 축척별 촬영 파라메타 비교

촬영구역	과천지역(축척 1/5,000)	수원지역(축척 1/20,000)
촬영일자	2002년 2월 26일	2002년 3월 4일
촬영용 카메라 노출간격	RC 30($f=152.486\text{mm}$) auto(6-7sec)	RC 30($f=152.486\text{mm}$) 수동(23-24sec)
블러의 크기 축척 중복도	3km × 6.3km 1/5,000(비행고도 875m) P=75%, Q=45%	22km × 24km 1/20,000(비행고도 3,300m) P=60%, Q=40%
사진 및 스트립 수 Object points	97매 5스트립 103 points	126매 9스트립 212 점
기준점 숫자 정확도.	89(평균: 42, 표고: 47) Sx,y=±2cm, Sz=±3cm	129(38 : 평면, 110 : 표고) Sx,y=±7cm, Sz=±14cm
투영중심의 정확도	Sx ₀ ,y ₀ =±9cm, Sz ₀ =±4cm	Sx ₀ ,y ₀ =±9cm, Sz ₀ =±4cm
GPS 수신기	항측기	Novatel Millennium 2000
	DGPS 기준국	Leica AT502(촬영지역내)
		Trimble 4000SSi(대구)
		Ashtech(부산)

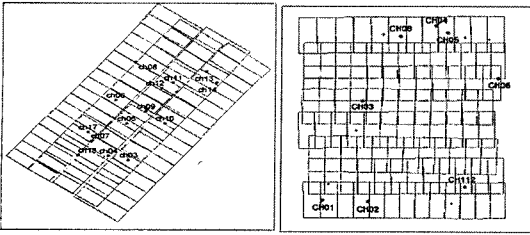


그림 2. 축척별 검사점의 배치도

점하여야 하나, 본 실험에서는 다양한 비교분석을 위하여 1모델당 1점씩 선점하였다. 선점조건을 만족하여 선점된 평면기준점이 표고점으로도 이용할 수 있도록 하였다. 이와는 별도로 실험결과의 객관적인 검증은 위하여 과천지역은 17개의 검사점을, 수원지역에서는 8개의 검사점(그림 2 참조)을 각각 GPS 측량으로 수행하였다. 지상기준점 측량성과의 정확도는 1:5,000의 경우 평면 약 2cm, 표고 3cm수준이며, 1:20,000의 경우에는 평면 약 7cm, 표고 14cm정도로 표고점이 평면점에 비하여 오차가 큰 편이다.

3.2 자료처리

3.2.1 GPS/INS 자료처리

IMU 관측자료의 처리와 동시에 항공기에 탑재된 GPS 수신기에서 관측된 자료를 앞에서 설명한 관측당시의 수신상태와 PDOP 등을 고려하여 불명확정수를 결정하고, GPS에 의한 지상기준점 측량의 결과를 산출하였다. 이때 DGPS 처리를 위한 기준국으로는 블럭내에 설치한 GPS 기준국과 연계하여 기선거리에 따른 오차의 영향을 소거하여 높은 정확도를 얻을 수 있도록 하였다. GPS/IMU 통합자료처리를 위한 소프트웨어는 POS/AV 510에 내장된 POSpac으로 총 4개의 모듈로 구성되어 있다. 즉, 관성자료의 자동기록과 처리, GPS와 연계를 위한 특수한 칼만필터링 기능과 IMU의 동적오차 모델링 및 중력 모델링 기능 등, 최적의 GPS/IMU 연계에 의한 최적의 위치자료와 자세 자료를 제공한다. 기타 POSpac의 주요한 기능과 특징은 자료 추출을 위해 GUI 인터페이스 제공과 결과의 플로팅이 가능하며, 관측된 데이터의 무결성 검사기능, 다중 GPS 기준국 자료처리 및 불명확 정수의 처리기능 등이다. 그리고 센서간의 편심벡터 및 초기정렬오차 보정, 강결합 GPS/IMU 통합, 통합결과의 스무딩이 가능한 점 등이 있다.

3.2.2 사진자료의 처리

블럭조정을 위해 먼저 해석도화기 P33을 이용하여 사진

상에 촬영된 지상기준점, 검사점 및 중형접합점의 사진좌표를 정밀하게 관측하였다. 다음으로는 GPS/INS 항측의 수행시 최적의 블럭 형태와 지상기준점 배치를 알아내기 위한 비교 판단의 기준이 되는 기준조정을 수행하였다. 기준조정은 모든 기준점을 사용하여 기존의 항측방식대로 조정을 한 후, 이의 결과를 오차가 없는 것으로 간주하여 나중에 지상기준점의 수와 배치형태에 따라 블럭의 정확도 변화뿐만 아니라 GPS/INS 항측의 결과와 비교를 가능하게 하는 GPS/INS 항측의 선행 작업과정이다. 기준 조정값을 구하는 방법에는 지상의 검사점을 이용하는 방법과 블럭조정 후의 각 사진에 대한 6개의 표정요소에 대한 정확도를 비교하는 방법이 있다. 후자의 방법은 GPS/INS 항측의 실용화 목적인 최소기준점의 설치가 보편화되면 지상측량을 수행하지 않으므로 매우 중요한 의미를 가진다.

본 연구에 이용된 블럭조정용 소프트웨어는 BINGO-F로 번들조정의 원리를 기반으로 대규모 항공사진의 블럭조정, 지상사진측량 및 측지망 조정이 가능한 복합적인 측량용 프로그램이다. 특히 항측분야의 활용시에는 동적 GPS관측자료나 GPS/IMU의 결과치를 부가의 변수로 도입하여 블럭조정이 가능한 기능을 가지고 있다. 조정의 기본알고리즘은 투영중심의 원리를 만족시키는 개선된 수학적 모델을 기초로 하며, 미지수의 조정계산은 Newton의 공식에 의해 반복 계산되며 이때 경중률이 부과된 잔차의 제곱의 합이 최소가 되는 최소제곱법의 원리를 따른다.

3.2.3 관측자료의 전처리 결과

위에서 기술한 사진좌표의 관측, GPS 지상기준점 관측

표 2. GPS/IMU 관측자료의 전처리 결과

구분	수량	단위	결과 정확도			
			Sx	Sy	Sz	
접합점	tie point	133 202	μm	6 10	6 10	
	pass point	70 127	μm	6 10	6 10	
지상기준점	평면	47 38	cm	5 20	5 20	
	표고	110	cm			10 20
GPS/INS	GPS		cm	15 30	15 30	15 30
	INS		deg	0.008 0.009	0.008 0.009	0.008 0.009

의 결과 및 동적 GPS결과의 관측을 요약 정리하면 표 2와 같다. 여기서, 각 열의 수치중 상단은 사진측척 1:5,000, 하단은 1:20,000에 대한 값이다. 이 결과치를 사전정보로 입력하여 GPS/INS 사진기준점 측량을 수행하여 재래식 결과와 비교하였다.

3.3 관측결과 비교 항목 및 방법

본 연구의 목적은 항공사진측량에 GPS/IMU를 이용하여, 사진의 외부표정요소를 직접 구하여 다양한 측면에서 재래식 항측기법과 비교하여 GPS/INS 항측의 적용 가능성을 입증하는 일이다. 비교내용은 블록의 기하학적 형태와 기준점수에 따른 결과비교, GPS/IMU의 좌표변환에 따른 오차비교, 촬영기준점의 기선거리에 따른 비교 등이다.

이러한 비교항목 대상들의 결과를 검증하기 위한 전체 흐름도는 그림 3과 같다. 그림에서 보듯이 왼쪽 부분은 기존의 재래식 사진기준점측량 절차에 따라 그 결과를 계산하고, 다음으로 그림의 오른쪽 부분과 같이 GPS/IMU에 의한 결과를 검사점에 대한 정확도, 외부표정요소 결정의 정확도 등으로 분류하여 정리한다. 마지막으로 양 결과를 서로 비교하여 GPS/IMU의 다양한 측면에서의 활용가능성에 대한 결론을 도출하였다.

4. 결과비교 및 분석

4.1 검사점의 정확도 비교

4.1.1 재래식 블록조정의 결과

재래식기법과 GPS/INS항측의 결과비교를 위해서는 먼저 모든 지상기준점을 다 사용하여 기존의 사진기준점 측량 방식대로 블록조정을 수행하여 조정전과 조정후의 검

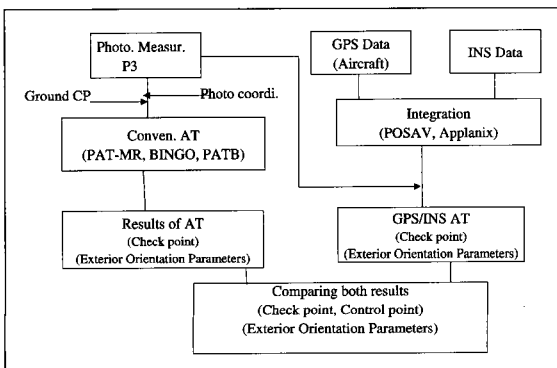


그림 3. 결과비교를 위한 작업 흐름도

사점에 대한 좌표값의 차이를 정확히 산출하는 기준조정을 수행하였다. 표 3에는 재래식 블록조정에 의한 기준조정의 결과를 축척별로 최대오차와 표준편차를 수록하였다. 그리고 기준점의 감소에 따른 검사점에서의 잔차에 대한 오차는 다음의 표 4와 표 5에 축척별로 구분 수록하여 GPS/INS항측의 결과와 비교가 되도록 하였다. 축척 1:5,000의 경우 검사점에 대한 전체 블록의 표준편차는 평면이 6cm, 표고가 15cm이다. 그리고 최대오차는 평면에서 12cm, 표고에서는 16cm로 촬영축척 1:5,000의 경우에 필요한 요구 정확도를 충분히 만족하는 결과임을 알 수 있다.

사진축척 1:20,000의 경우에는 검사점에 대한 표준편차가 X, Y는 각각 28cm와 46cm, Z는 약35cm이며, 최대 오차는 블록의 중앙에 위치한 검사점에서 수직오차가 110cm에 이르고 있다. 이를 제외하면, 두 축척의 경우 모두 블록의 중앙부분은 정확도가 좋으며 외곽으로 갈수록 오차가 증가하는 사진기준점 측량에 의한 블록조정의 일반적인 경향을 보여주고 있다. 사진축척 1:20,000의 경우에도 1:5,000의 지도제작에 필요한 정확도를 충족하고 있다. 이 검사점의 정확도는 GPS/INS AT에 의한 결과의 정확도와 비교를 위한 기준으로 이용된다.

4.1.2 GPS/INS 결합블럭조정의 결과

표 4에는 사진축척 1:5,000의 경우에 대하여 재래식 AT와 GPS/INS AT의 조정결과의 정확도를 기준점의 수

표 3. 기준조정의 검사점에서의 잔차

축척	구분	DX(cm)	DY(cm)	DZ(cm)
1:5,000	최대오차	-11.9	-8.9	-15.7
	RMSE	6.7	5.6	15.0
1:20,000	최대오차	-46.0	67.2	112.0
	RMSE	28.0	45.8	34.8

표 4. 기준점 수에 따른 블록조정의 정확도(1:5,000)

기준점수	표준편차(m) GPS+INS AT/재래식		
	Sx	Sy	Sz
88	0.07/0.07	0.07/0.06	0.14/0.15
20	0.07/0.07	0.06/0.06	0.14/0.18
10	0.06/0.09	0.08/0.08	0.12/1.91
8	0.08/0.10	0.09/0.08	0.14/2.30
6	0.10/0.08	0.07/0.10	0.25/2.38
4	0.08/0.12	0.11/0.13	0.15/4.04

에 따라 정리 수록하였다. 두 조정결과의 상호 비교가 쉽도록 하기 위해 재래식 결과는 분모에, GPS/IMU의 결과는 분자에 표시하였다. 재래식 AT의 경우에는 기준점의 수가 줄어들어 따라 특히 높이에서 급격한 오차증가현상이 발생하나 GPS/INS AT의 경우에는 이러한 현상이 전혀 일어나지 않는다. 또한 모든 기준점이나 소수의 기준점인 경우에도 정확도의 전체변화가 거의 없음을 알 수 있다.

가장 특이한 점은 재래식 방법으로는 불가능한 최소기준점인 4점의 경우에도 번들조정이 가능하다는 것이다. 이는 바로 상기준점이 줄어들어 따라 GPS/INS 관측값이 이를 대신하여 지상기준점의 역할을 충분히 수행하고 있음을 알 수 있다. 하지만 기준점 10점 이하인 경우에는 높이오차가 다소 커지는 경향이 있으므로 최소 10점 이상, 안전을 고려하면 20점 정도를 블록내에 균등 배치하는 것이 좋다. 사진축척 1:20,000의 경우에 대하여도 1:5,000의 경우와 동일한 방법으로 두 기법의 결과를 표 5에 수록하였다.

표 5에서 재래식 AT의 경우는 기준점수를 줄이면 평면 오차와 수직오차가 증가함을 알 수 있다. 특히, 기준점의 수가 8점 이하의 경우에는 모든 기준점에 비해 수직오차의 변화는 두드러지게 증가함을 알 수 있다. 이는 블록의 크기에 비해 수직기준점의 수가 절대적으로 부족한 원인에 의한 것이다. 하지만 기준점이 10점 이상인 경우에도 요구정확도를 충족하고 있어 번들조정기법의 우수성을 반증하고 있다. 그러나 땅 전체에 대한 결과의 표준편차보다는 일부 지역에서 큰 크기의 과대오차가 발생하고 있어 정밀 항측의 경우에는 실제로 적용에 세심한 주의를 하여야 한다. 반면, GPS/INS AT의 결과는 점배치와 관계없이 4점 이상의 지상기준점을 사용하였을 경우 수평 오차와 수직오차가 큰 변화 없이 양호하게 나타났다. 하

지만 단지 4개의 기준점만을 사용한 경우에는 기타의 경우에 비하여 평면과 수직오차가 기타의 경우에 비하여 눈에 띄게 오차가 증가하고 있어 GPS/IMU AT의 경우라도 안전성을 확보하기 위하여 최소 최소 10점이상, 되도록이면 20점 이상의 기준점을 배치하는 것이 바람직하다.

4.2 외부표정요소의 정확도 비교

4.2.1 재래식 블록조정결과

모든 기준점을 사용하여 조정한 각 사진에 대한 외부표정요소의 정확도를 위치와 회전각으로 나누어 계산·분석하였다. 먼저 외부표정요소의 정확도를 서로 비교하기 위해 사진축척 1:5,000의 경우에 대하여 기준점의 수에 따라 재래식 AT의 결과를 아래의 표 6에 수록하였다.

표 6에서 보듯이 재래식 AT의 경우 기준점이 4개인 경우를 제외하고는 6개의 외부표정요소 중 투영중심의 좌표에 해당하는 세개의 위치는 기준점의 감소에 거의 영향을 받지 않고 있다. 회전각의 경우 S_{ϕ} , S_{ω} 의 오차는 기준점의 감소에 따라 비례하여 증가하나, S_{κ} 는 거의 변동이 없음을 알 수 있다. 또한 기준점이 10점 이하가 되면 표정요소 중 회전각의 오차가 30"정도로 매우 커져 기준점의 보강 없이는 조정결과의 적용이 어려운 경우가 발생한다. 사진축척 1:20,000의 경우에 대하여도 기준점의 수에 따라 재래식 AT의 결과를 표 7에 수록하였다.

표 7에서 보듯이 축척 1:20,000의 경우에도 기준점이 4개인 경우를 제외하고는 1:5,000의 경우와 마찬가지로 S_{ϕ} , S_{ω} 의 오차는 기준점의 감소에 따라 비례하여 증가하나, S_{κ} 는 급격히 변하지 않고 있음을 알 수 있다. 하지만 1:5,000의 경우와 비교하여 기준점이 10점 이하가 되면 특히 위치오차가 급격히 증가하고 있으며, 회전각의 오차도 비교적 크게 증가한다. 이는 비행고도의 상승, 사진좌표 측정의 정밀도 및 검사점의 수와 배치 등에 기인한 것

표 5. 기준점 수에 따른 블록조정의 정확도(1:20,000)

기준점수	표준편차(m) GPS+INS AT/재래식		
	Sx	Sy	Sz
129	0.34/0.28	0.39/0.46	0.13/0.35
20	0.33/0.32	0.34/0.51	0.20/0.46
10	0.38/0.42	0.41/0.73	0.26/0.58
8	0.42/0.41	0.42/0.58	0.27/1.84
6	0.46/0.39	0.46/0.85	0.16/4.48
4	0.86/1.26	0.85/1.61	0.78/23.8

표 6. 재래식 AT의 외부표정요소 정확도(1:5,000)

기준점수	위치(m)			회전각(")		
	Sxo	Syo	Szo	S ϕ	S ω	S κ
88	0.09	0.09	0.04	19	19	7
20	0.09	0.09	0.08	18	18	11
10	0.12	0.11	0.07	29	26	8
8	0.15	0.13	0.10	36	31	9
6	0.16	0.14	0.14	38	33	8
4	0.37	0.44	1.27	96	115	11

표 7. 재래식 AT의 외부표정요소 정확도(1:20,000)

기준점수	위치(m)			회전각(°)		
	S _{Xo}	S _{Yo}	S _{Zo}	S ϕ	S ω	S κ
129	0.49	0.57	0.29	29	34	8
20	0.55	0.68	0.45	32	41	8
10	0.62	1.06	1.05	36	66	11
8	0.65	1.07	1.08	37	67	12
6	0.74	1.45	2.59	40	93	14
4	7.22	8.22	33.86	476	541	18

으로 판단되며 이에 대한 정밀한 분석이 필요하다.

4.2.2 GPS/INS 결합블럭조정결과

GPS/INS AT가 기준점의 감소에 따른 재래식 AT의 문제를 어느 정도 해결 가능한지를 검증하기 위해 재래식 AT의 경우와 같이 기준점의 감소에 따른 외부표정의 정확도를 산출하여 그 결과를 축척별로 구분하여 표 8과 표 9에 수록하였다.

표 8에서 알 수 있듯이 GPS/INS AT의 경우 기준점의 감소에 상관없이 외부표정의 정확도가 매우 균질하다. 특이할 만한 사실은 최소 4개의 기준점인 경우에도 모든 기준점을 사용한 경우와 거의 대등한 결과를 얻었다. 따라서 검사점의 경우와 마찬가지로 지상기준점이 줄어들에 따라 GPS/INS가 이를 대신하여 지상기준점의 역할을 훌륭하게 수행하고 있음을 재확인 할 수 있다.

축척 1:20,000의 경우에도 GPS/INS AT는 기준점의 감소에 상관없이 외부표정의 정확도가 매우 균질하다. 하지만 최소 4개의 기준점인 경우에는 위치오차가 다른 경우에 비해 다소 증가하는 사실을 알 수 있다. 여기에서 주목할 만한 사실은 회전각의 변화이며, GPS/INS AT의 경우 기준점이 감소하여 단지 4점만 사용하여도 전혀 회전각

표 8. GPS/INS AT의 외부표정요소 정확도(1:5,000)

기준점수	위치(m)			회전각(°)		
	S _{Xo}	S _{Yo}	S _{Zo}	S ϕ	S ω	S κ
88	0.09	0.09	0.04	19	19	7
20	0.06	0.06	0.06	13	13	11
10	0.07	0.07	0.08	14	13	10
8	0.08	0.07	0.09	15	14	10
6	0.09	0.07	0.10	17	15	11
4	0.10	0.09	0.14	18	16	11

표 9. GPS/INS AT의 외부표정요소결정 정확도(1:20,000)

기준점수	위치(m)			회전각(°)		
	S _{Xo}	S _{Yo}	S _{Zo}	S ϕ	S ω	S κ
129	0.13	0.15	0.12	7	8	7
20	0.13	0.15	0.14	7	8	7
10	0.15	0.17	0.19	7	8	7
8	0.16	0.18	0.21	7	8	7
6	0.20	0.21	0.28	8	8	7
4	0.37	0.40	0.46	9	9	8

결정에는 전혀 문제가 없음을 알 수 있다. 즉, GPS/IMU가 최소의 기준점만을 이용해도 외부표정요소의 결정을 잘 수행함을 알 수 있다. 특히 GPS/IMU는 비행고도에 상관없이 회전각을 매우 정밀하게 관측할 수 있어 중측 및 소측적의 지형도 제작, 정사사진제작에 매우 경제적이고 효율적인 방법임을 입증하고 있다.

5. 결 론

본 논문은 GPS/IMU 통합에 의한 항공사진의 블럭조정 결과의 정확도를 사진축척과 기준점 등 비행 파라메타에 따라 분석 비교한 연구로서 실제 비행실험에서 얻은 자료를 기초로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, GPS/INS 항공사진축량은 재래식 사진기준점 측량에 비해 지상기준점의 수를 획기적으로 줄일 수 있었다. 본 연구의 경우 사진축척 1:5,000인 과천 20km²의 촬영면적에 대하여 재래식 방법의 경우 88점의 기준점이 필요하였으나, 새로운 방법인 GPS/INS 항공측의 경우에는 최소 10점만으로, 안전성을 고려하여 20점만 사용하면 요구정확도를 충족할 수 있었다. 또한, 사진축척 1:20,000인 수원 650km²의 촬영면적에 대하여는 재래식 방법으로는 120개 이상의 기준점이 필요하나 GPS/INS AT의 경우에는 8점 이상이면 정확도를 충족할 수 있으며, 10개 이상이면 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

둘째, 두 축척의 경우에 동일하게 재래식 항공측의 경우 최소의 지상 기준점인 네 점만으로는, 특히 표고의 정확도가 수m 이상을 초과하여 사진기준점 측량이 전혀 불가능한 반면, GPS/INS 항공측의 경우에는 대부분의 고정밀 항공측의 경우를 제외하고는 적용이 가능한 것으로 판단된다.

셋째, 재래식 항공측의 경우에는 축척의 변화에 따라 블럭조정의 결과가 민감하게 반응하여 대축척에 비해 소측

적인 경우에는 외부표정요소의 정확도가 급격히 낮아지고 있으나, GPS/INS항측의 경우에는 축척의 변화와 기준점의 감소에 크게 상관없이 균질한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 GPS/IMU에 의한 외부표정요소결정은 비행고도에 상관없이 정밀하게 결정이 가능하여 소축척내지는 중축척의 지도제작과 정사사진제작에 매우 경제적인 기법으로 평가된다.

넷째, 본 연구의 결과는 특정한 GPS/IMU를 사용한 자료이므로 향후 GPS/INS 항측의 보편적인 활용을 위해서는 다양한 장비와 실험을 거쳐서 실무에 적용 가능한 기준을 마련하는 것이 바람직하다. 또한, 향후 도입될 항측용디지털 카메라와 GPS/IMU의 연계방안을 심도 있게 연구하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

국립지리원 (2002), GPS/INS 항공사진축량의 실무적용을 위한 연구, 건설교통부 국립지리원.
 한상득, 조규진, 이재원 (2004), GPS/INS에 의한 외부표정요소 결정에 관한 경험적 연구, 한국측량학회지, 제 22권, 제 1호, pp. 53-62.
 김형태 (2001), GIS 건물레이어 자동구축을 위한 Lidar 데이터와 항공사진의 융합, 서울대학교 대학원 박사학위논문, pp. 21-35.
 김충평 (2000), GPS를 이용한 투영중심 위치결정 및 사진기준

점측량에 관한 연구, 명지대학교 대학원 박사학위 논문.
 박운용, 강준목, 이재원 (1995), GPS-인공위성 보조에 의한 소규모 지역의 항공삼각측량, 대한토목학회 논문집, 제 15권, 제 6호, pp. 1731-1742.
 염재홍 (2001), GPS/INS 국내실험 및 활용방안, From data to GIS, 한진정보통신(주) 발표집.
 이종출, 이재원, 신상철 (1997), GPS-위성보조에 의한 대규모 지역의 결합번들블럭조정, 대한토목학회 논문집, 제 III-1호, pp. 71-79.
 Ackermann, F. (1986), Utilization of Navigation Data for Aerial Triangulation, IAP Vol. XXV, Part A3.
 Alamus, R., Baron, A., and Talaya, J. (2001), Integrated Sensor Orientation at ICC, Mathematical Models and Experiences, Integrated Sensor Orientation of OEEPE-Workshop, Hanover.
 Jacobsen, K. (1991), Trends in GPS Photogrammetry, Technical Papers of ACSM-ASPRS. Vol. 5, pp. 208-217.
 Jaonee Lee. (1996), Untersuchungen von Verfahren zur kombinierten Aerotriangulation mittels integriertem GPS/INS, WAUH Nr. 220.
 Kruck, E., Wuenna, G. and Bagge, A. (1996), Advanced Combined Bundle Block Adjustment with Kinematic GPS Data, ISPRS Comm. III/1, Vienna.
 Kruck, E. (2001), Combined IMU Sensor Calibration and Bundle Adjustment with BINGO-F, Integrated Sensor Orientation of OEEPE-Workshop, Hanover.
 Skaloud, J., Cramer, M., and Schwarz, K-P. (1996), Exterior Orientation without Ground Control, Proc. of ISPRS Congress, Comm. III, Vienna.

(접수일 2005. 9. 10, 심사일 2005. 9. 16, 심사완료일 2005. 9. 26)