

# 정밀절대측위를 이용한 양산지역의 지각변위 해석

## Analysis of the Crustal Displacement at Yangsan Using Precise Point Positioning

박준규<sup>1)</sup>

Park, Joon Kyu

### Abstract

Yangsan fault system is a large fault more than 170km and one of the important structures Geologically that has been create recently in the Korean Peninsula. Debates have been made incessantly and widely throughout the Yangsan fault system because it's a lot of earthquake record. In this study, GPS data that was received from Yangsan GPS station in were processed by the Precise Point Positioning and the movement velocity was calculated by the statistical process about the results, where is the fault zone. The results showed that Yangsan is moving by azimuth angle of 126° and the velocity of 49mm/year. It is respected that this results will be utilized in basic data about geophysics.

Keywords : GPS, Precise Point Positioning, Yangsan Fault, CORS, Movement Velocity

### 초 록

양산단층은 한반도의 남동쪽에 위치한 길이 170km 이상의 대규모 단층이며, 지질학적으로 한반도에서 가장 최근에 형성된 중요한 구조대 가운데 하나이다. 또한 지진학적 관점에서 볼 때, 과거로부터 수많은 지진 기록이 존재하고 있어 활성단층의 여부에 대한 논란이 계속 되고 있다. 이에 본 연구에서는 한국지질자원 연구원의 양산 GPS 상시관측소로부터 수신된 GPS 자료를 정밀절대측위 방법으로 처리하고, 처리결과를 이용하여 양산상시관측소의 이동속도를 계산하였다. 연구결과 양산지역이 방위각 약 126°의 49mm/year 속도로 이동하고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 단층지역의 지구물리 해석에 기초자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심어 : GPS, 정밀절대측위, 양산단층, 상시관측소, 이동속도

## 1. 서 론

지난 2008년 5월 중국의 쓰촨성에 리히터 규모 8의 지진이 발생하여 사망자만 거의 10만 명에 육박하는 대참사가 일어났다. 또한 2010년 2월에는 칠레 연안에서 규모 8.8의 강진이 발생했다. 이 지진은 1900년대 이래 5번째로 큰 규모로 칠레 제2의 수도인 콘셉시온 동북쪽 115km 지점에서 시작되었으며, 이 지진으로 인해 수 백명의 사상자와 이재민이 발생하였다.

지진발생의 원인에 대한 연구는 1960년대 이후 판구조론에 의해 비약적인 발전을 하였다. 수없이 많은 지진의 진앙을 세계지도위에 표시해 본 결과 대다수의 지진이 지구 위에 큰 무늬를 이루는 모양을 나타내면서 한정된 지대에서 발생한다는 사실이 알려졌으며 이러한 사실과 지질학적 연구로부터 지구를 7개의 커다란 판과 여러 개의 작은 판으로 나눌 수 있게 되었다. 그림 1은 1963년부터 1998년까지의 지진 진앙 분포를 나타낸다.

최근까지 우리나라는 지진에 대해서 별다른 관심이

1) 정희원 · 충남대학교 건설방재연구소 연구원(E-mail:surveyep@empal.com)

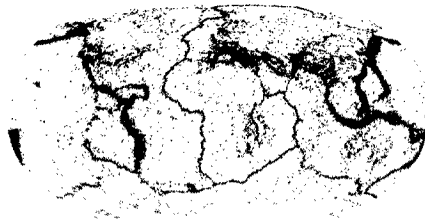


그림 1. 1963년~1998년의 지진 진앙 분포

없었으며, 지진의 발생가능성에 대해서도 충분한 연구가 진행되지 않았다. 실제로 1900년에서 2000년까지 100년간 우리나라의 지진활동은 상당히 미약하여 규모가 5를 초과하는 지진은 단 4회 밖에 발생하지 않았으며, 그중에서 3회는 도시에서 멀리 떨어진 지역에서 발생하였다. 따라서 우리나라에서는 지진에 의한 영향으로 아주 가벼운 지반진동을 경험한 적은 있으나 1978년 홍성지진을 제외하고는 지진에 의한 피해가 거의 없었다. 그러나 최근들어 지진활동이 다시 활발해짐에 따라 지진에 대한 관심이 고조되고 있다(장해남, 2007).

지구상에서 발생하는 대부분의 지진은 북미대륙의 서해안, 일본, 필리핀, 뉴질랜드로 연결되는 환태평양지진대와 같은 판의 경계에서 발생한다. 그러나 1812년 미국의 New Madrid에서 발생한 지진이나 1976년 중국 당산지진의 경우 등은 판의 경계가 아니라 판의 내부에서 발생한 지진이다(Smalley R. Jr. 등, 2005).

우리나라와 같이 판의 내부에 존재하는 지역의 지진활동은 상당히 예측하기도 어려울 뿐만 아니라 지진의 재현주기가 매우 길기 때문에 상당한 기간 동안에 특별한 지진활동이 없던 지역에서 강력한 지진이 발생한 당산이나 New Madrid의 경우와 같이 우리나라에서도 상당한 피해를 초래할 수 있는 지진이 발생할 가능성을 배제할 수는 없다. 따라서 과거의 지진활동 기록만으로 우리나라의 지진위험도를 평가하는 것은 적절하지 못하며 지진발생 위험지역의 절대적인 지각변동을 모니터링 하는 것이 필요하다.

인공위성기반의 측위항법 시스템인 GPS는 2000년 SA(Selective Availability)의 제거 이후 측위정확도 향상과 위성 신호 수신기술의 발달, 새로운 관측데이터 처리 알고리즘의 개발 등을 통해 전통적인 위치결정은 물론 지각운동의 추출을 비롯한 지구물리 분야에도 응용되고 있다(강준복 등, 2010).

최근 각종 지구물리자료의 축적과 GPS를 통한 지각의

변형에 대한 정보들이 축적되면서, 지각의 움직임을 결정하는 응력의 분포와 지반운동의 특성을 설명하려는 연구들이 다수 발표되고 있다(신영홍 등, 2006; 조재명 등, 2007; Chough et al., 2000; Hamdy et al., 2005; Jin et al., 2006; Vy Quoc Hai et al., 2000).

본 연구에서는 양산 상시관측소에서 수신된 2005년~2006년의 GPS 자료를 정밀절대측위 방법으로 처리하여 상시관측소의 이동을 모니터링 하고, 처리결과와 통계적인 처리를 통해 양산상시관측소의 이동속도를 산출하고자 하였다. 또한 산출된 양산 상시관측소의 이동속도를 우리나라 전체의 지각이동과 비교함으로써 양산단층지역의 지각이동 특징을 분석하고자 하였다. 그림 2는 본 연구의 흐름도를 나타낸다.

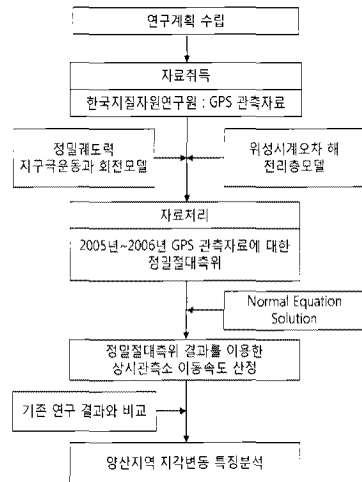


그림 2. 연구 흐름도

## 2. GPS 관측자료 취득 및 처리

### 2.1 연구대상지

단층은 지각변동에 의해 지각 중에 생긴 틈을 경계로 양쪽 지층이 움직여서 어긋난 것을 말한다. 양산단층은 한반도의 남동쪽에 위치한 길이 170km 이상의 대규모 단층으로 이 단층은 지질학적으로 한반도에서 가장 최근에 형성된 중요한 구조대 가운데 하나이며 지진학적 관점에서 볼 때, 과거로부터 수많은 지진 기록이 존재하고 있어 활성단층의 여부에 대한 논란이 계속 되고 있다. 이에 본 연구에서는 양산단층지역에 위치하고 있는 GPS 상시관측소를 연구대상지로 시계열적인 관측자료

의 정밀절대측위를 통해 양산지역의 이동 속도를 산출하고자 하였다. 그림 3은 우리나라의 주요 단층선을 나타낸다.

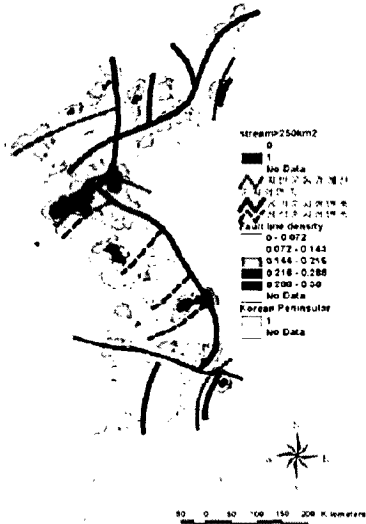


그림 3. 우리나라의 주요 단층선

### 2.2 GPS 관측자료의 취득

양산 GPS 상시관측소의 이동속도를 계산하기 위해 2005년 9월~2006년 8월에 해당하는 GPS 관측자료를 취득하였다. 그림 4는 한국지질자원연구원에서 운영 중인 GPS 상시관측소 현황을 나타낸다.

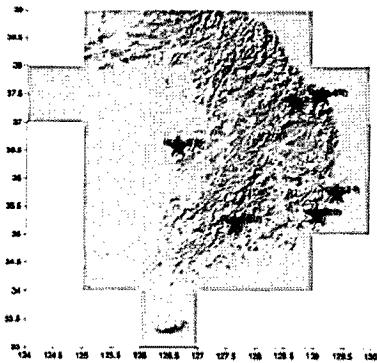


그림 4. 한국지질자원연구원GPS상시관측소현황

GPS 관측자료는 Trimble사의 4000SSE 수신기와 TRM29659.00 안테나로 수신된 자료로 1시간 간격으로 저장된 dat포맷의 자료이다. 표 1에 GPS 관측자료의 현황을 정리하였다.

표 1. GPS 관측자료 현황

관측기간	2005. 09. 24 ~ 2006. 08. 23
수신기	Trimble 4000SSE
안테나	Trimble TRM29659.00
관측자료 포맷	1시간 간격으로 저장된 DAT

또한, GPS 관측자료의 처리를 위해 NASA JPL(Jet Propulsion Laboratory), AIUB(Astronomical Institut Universität Bern), IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 Satellite Clock Coefficients, 정밀궤도력과 지구회전과 극운동 모델, 대류권 모델 및 전리층 모델을 취득하였다.

### 2.3 관측자료처리

취득한 양산 GPS 상시관측소의 관측파일은 1시간 간격으로 저장된 DAT 포맷의 파일로 하루단위의 자료처리를 위해 관측일별로 24시간씩의 RINEX 포맷으로 변환하였다. 관측자료의 RINEX 포맷 변환에는 TGO(Trimble Geomatics Office) 프로그램을 사용하였으며, 1시간 간격의 관측자료 24개를 24시간 자료로 변환한 다음 RINEX 포맷으로 변환하였다. 그림 5는 TGO 프로그램의 "Convert to RINEX" 화면을 나타낸다.

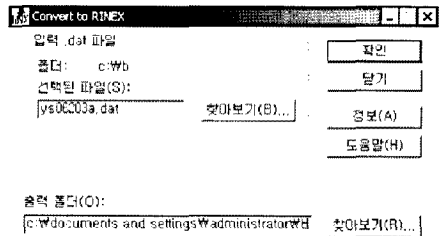


그림 5. convert to RINEX

GPS 자료처리 시 지구의 물리적 운동으로 인하여 발생하는 편차들은 적절한 모델을 이용해서 제거해야 하며, 이러한 보정은 극운동, 대기 하중, 해양 조석 부하 등이 포함된다(McCarthy, 1996). 본 연구에서는 NASA JPL, AIUB 및 IGS를 통해 제공되는 정밀 궤도력과 각종 모델들을 사용함으로써 이러한 보정 요소들을 소개하였다. 자료처리는 스위스 베른대학에서 개발한 학술용 소프트웨어인 Bernese 5.0의 BPE(Bernese Processing Engine)를 이용하여 정밀절대측위방법으로 처리하였다. GPS 데이터 처리를 위해 고도각 15° 이상의 반송파 위상자료를 이용하였으며 대류권 모델을 이용하여 신호 지연효과를

제거하고 위성의 위치정보는 IGS의 정밀궤도력을 사용하였다. 표 2에 GPS 자료처리 Parameter를 나타내었다.

표 2. GPS 자료처리 Parameter

Parameters	Description
Data Processing Methods	Precise Point Positioning
Observation Data	L1, L2 CODE and Phase
Satellite Ephemeris	Precise Ephemeris
Ambiguity Resolution	Quasi Ionosphere Free
Tropospheric Correction	Dry and Wet Niell Model
Earth Gravity Potential	JGM3
Sub-daily Earth rotation parameters	IERS2000
Nutation	IAU2000
Antenna Model	Absolute Model
Solar System Ephemerides	JPL DE200

BPE는 자동화된 GPS 자료처리 프로그램으로 1995년부터 지금까지 IGS Analysis Center의 Global IGS Network의 자료처리에 이용되고 있으며, 현재 일본의 GSI(Geographical Survey Institute)에서도 전국적인 GPS Network 자료처리용으로 사용되고 있다(Tanaka et al., 2007). 그림 6은 BPE 처리과정을 나타낸다(Dach R. et al., 2007).

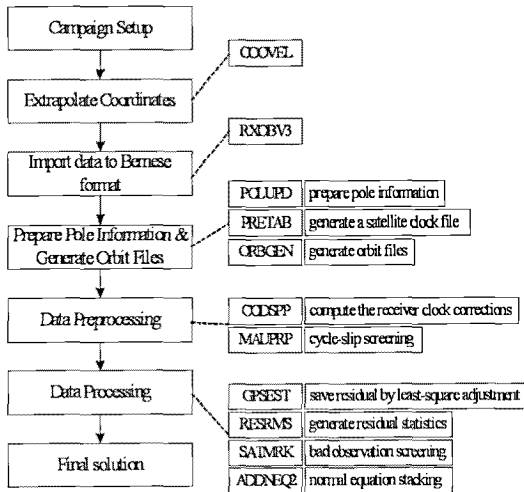


그림 6. BPE 처리과정

표 3에 2005년 9월 ~ 2006년 8월까지의 양산 GPS 상시관측소의 관측자료를 정밀궤도력위주로 처리한 결과 중

일부를 나타내었다. 처리결과는 ITRF2005를 기준으로 한 3차원 직교좌표이며, 관측일 당시의 위치를 나타낸다.

표 3. GPS 관측자료 처리 결과

관측일	X(m)	Y(m)	Z(m)
2005-09-24	-3282660.8391	4043917.5660	3669298.4770
2005-09-26	-3282660.8256	4043917.5516	3669298.4646
2005-09-27	-3282660.8335	4043917.5611	3669298.4639
2005-09-28	-3282660.8445	4043917.5412	3669298.4526
2005-09-29	-3282660.8465	4043917.5576	3669298.4694
2005-09-30	-3282660.8307	4043917.5428	3669298.4562
2005-10-01	-3282660.8469	4043917.5503	3669298.4613
2005-10-03	-3282660.8578	4043917.5745	3669298.4849
2005-10-04	-3282660.8518	4043917.5818	3669298.4796
2005-10-05	-3282660.8192	4043917.5426	3669298.4729
2005-10-06	-3282660.8471	4043917.5758	3669298.4882
2005-10-07	-3282660.8489	4043917.5716	3669298.4950
2005-10-08	-3282660.8358	4043917.5568	3669298.4748
2005-10-10	-3282660.8296	4043917.5490	3669298.4655
2005-10-11	-3282660.8292	4043917.5420	3669298.4577
2005-10-12	-3282660.8315	4043917.5513	3669298.4664
2005-10-13	-3282660.8564	4043917.5709	3669298.4800
2005-10-14	-3282660.8406	4043917.5787	3669298.4792
⋮	⋮	⋮	⋮
2006-08-03	-3282660.8841	4043917.5624	3669298.4601
2006-08-04	-3282660.8802	4043917.5741	3669298.4597
2006-08-05	-3282660.8762	4043917.5592	3669298.4533
2006-08-07	-3282660.8626	4043917.5499	3669298.4448
2006-08-08	-3282660.8764	4043917.5720	3669298.4635
2006-08-09	-3282660.8722	4043917.5686	3669298.4574
2006-08-10	-3282660.8912	4043917.5785	3669298.4674
2006-08-11	-3282660.8679	4043917.5669	3669298.4576
2006-08-12	-3282660.8716	4043917.5736	3669298.4596
2006-08-14	-3282660.8807	4043917.5830	3669298.4594
2006-08-15	-3282660.8815	4043917.5762	3669298.4626
2006-08-16	-3282660.8726	4043917.5696	3669298.4514
2006-08-17	-3282660.8697	4043917.5633	3669298.4422
2006-08-18	-3282660.8663	4043917.5609	3669298.4519
2006-08-19	-3282660.8778	4043917.5640	3669298.4556
2006-08-21	-3282660.8742	4043917.5698	3669298.4605
2006-08-22	-3282660.8737	4043917.5586	3669298.4530
2006-08-23	-3282660.8705	4043917.5670	3669298.4619

그림 7~그림 9는 GPS 관측자료 처리결과를 3차원 직각좌표로 표시한 것으로 그래프의 가로축과 세로축은 각각 날짜와 좌표를 나타낸다.

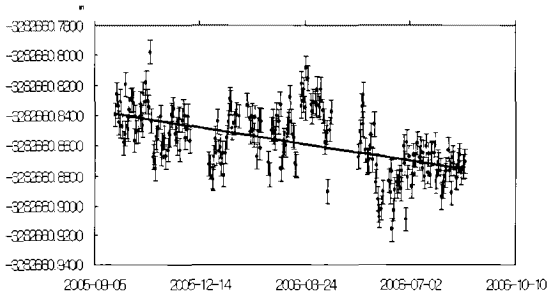


그림 7. GPS 관측자료 처리결과 X 좌표 시계열

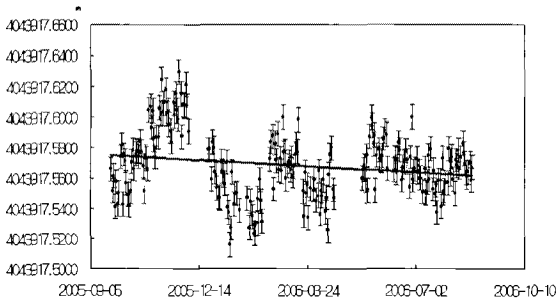


그림 8. GPS 관측자료 처리결과 Y 좌표 시계열

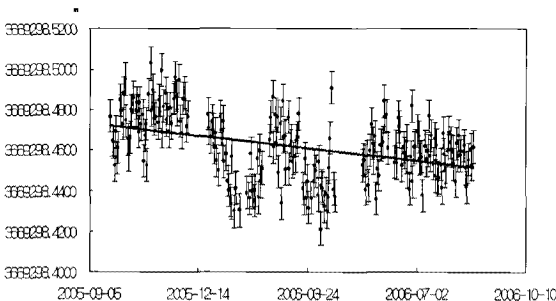


그림 9. GPS 관측자료 처리결과 Z 좌표 시계열

자료처리 결과 양산 상시관측소의 위치가 X, Y, Z 각 성분별로 (-)방향으로 이동하고 있음을 알 수 있었다. 그림 10~그림 12는 GPS 관측자료 처리결과를 경·위도 및 타원체고로 나타낸 것이다.

처리결과는 양산 상시관측소의 위치변화를 모니터링 하기위해 2005년 9월 24일(DOY 2005.267)을 기준으로 조정한 결과이다. 그래프의 가로축은 관측일이며, 세로축은 변화량을 나타낸다.

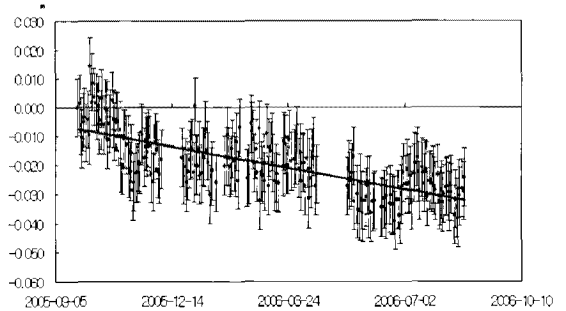


그림 10. GPS 관측자료 처리결과 위도방향 시계열

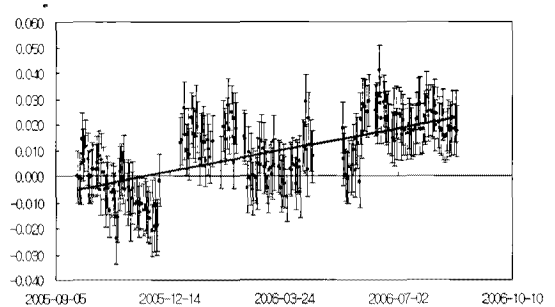


그림 11. GPS 관측자료 처리결과 경도방향 시계열

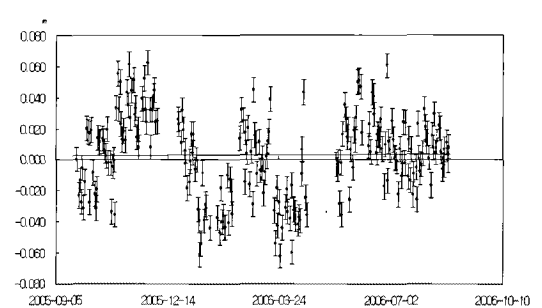


그림 12. GPS 관측자료 처리결과 타원체고 시계열

관측자료 처리결과 경·위도 좌표의 시계열 결과를 통해 양산 상시관측소가 우리나라 지각변동과 비슷한 남동쪽 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있었다. 타원체고의 경우 위도나 경도방향과 같이 뚜렷한 방향성은 보이지 않았다.

### 3. 이동속도 산출 및 분석

본 연구에서는 각각의 관측일 별로 처리된 결과를 Bernese의 ADDNEQ2 모듈로 조합하여 양산 상시관측소의 이동속도를 계산하였다. ADDNEQ2는 각 session의

처리결과로 생성된 독립된 Normal Equation Solution들의 통계학적인 조합으로부터 Multi-session Solution을 계산하기 위해 개발되었다.

일정기간 이상의 Normal Equation Solution이 있다면 이들의 조합으로부터 측정의 이동 속도를 계산할 수 있다 (Dach R. et al., 2007). 그림 13은 ADDNEQ2 모듈의 속도 계산 기본원리를 나타낸다.

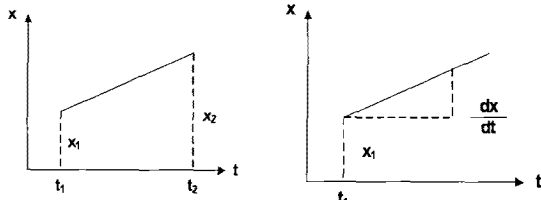


그림 13. ADDNEQ2의 속도계산의 기본원리

본 연구에서는 2005년 9월 ~ 2006년 8월의 GPS 관측 자료 처리결과를 이용하여 양산 상시관측소의 이동속도를 산출하였다. 표 4에 ADDNEQ2모듈을 이용해 산출한 양산 GPS 상시관측소의 각 성분별 이동속도를 정리하였다.

표 4. 상시관측소 이동속도 산출 결과

X방향(mm) (RMSE)	Y방향(mm) (RMSE)	Z방향(mm) (RMSE)
-43.8 (±0.9)	-8.4 (±1.1)	-19.9 (±0.9)
위도방향(mm) (RMSE)	경도방향(mm) (RMSE)	타원체고방향(mm) (RMSE)
-28.5 (±0.3)	39.3 (±0.5)	5.7 (±1.6)
방위각(°)		이동속도 (mm/year)
126		48.5

연구결과 양산 상시관측소의 이동속도는 48.5mm/year의 크기로 계산되었으며, 표준편차는 수평방향이 ±0.3~±0.5mm/year, 수직방향이 ±1.6mm/year의 값을 보였다. 수평방향에 비해 수직방향의 표준편차에서 다소 큰 값이 나타나는 것은 GPS의 수직방향 정확도가 상대적으로 수평방향보다 떨어지는 특징 때문인 것으로 판단된다.

산출된 결과로부터 양산 상시관측소가 방위각 126°의 남동쪽 방향으로 이동 중이며, 타원체고 방향으로는 5.7mm/year의 크기로 융기하고 있음을 알 수 있었다. 한편, 양산 상시관측소 이동의 특징을 분석하기 위해 기존

연구결과로 산출된 양산 주변지역 GPS 상시관측소의 이동속도와 비교하였다. 표 5는 기존 연구 결과로 산출된 대구, 창녕, 부산 및 울산 지역의 상시관측소 이동속도를 나타내며(김경수, 2009), 그림 14와 그림 15에 양산 상시관측소와 기존 연구결과와의 비교 그래프를 나타내었다.

표 5. 양산 주변 GPS 상시관측소 이동 속도(김경수, 2009)

관측소	위도방향(mm) (RMSE)	경도방향(mm) (RMSE)	이동속도 (mm/year)	방위각 (°)
대구	-13.1 (±0.2)	20.3 (±0.5)	24.2	122.8
창녕	-14.6 (±0.2)	26.1 (±0.3)	29.9	119.2
부산	-15.7 (±0.2)	29.0 (±0.3)	33.0	118.4
울산	-13.9 (±0.2)	27.0 (±0.3)	30.4	117.2

※2001년~2007년 관측자료 처리결과

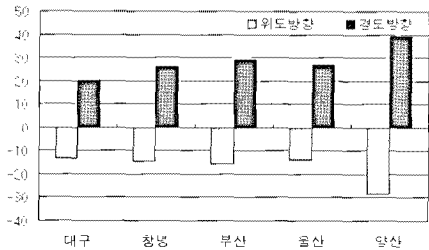


그림 14. 주변 GPS 상시관측소와의 이동속도 비교

기존 연구와의 비교 결과 양산 상시관측소는 주변상시관측소와 비슷한 방향이 나타났지만, 이동속도의 경우 다소 큰 값을 나타내었다. 그림 15에 각 상시관측소의 위치와 이동속도를 표시하였다.

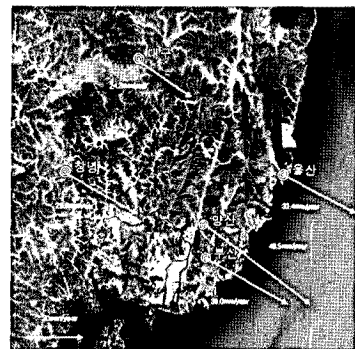


그림 15. 상시관측소의 이동속도

## 4. 결 론

본 연구에서는 양산 상시관측소로부터 수신한 시계열적인 GPS 자료에 대한 정밀절대측위를 통해 양산상시관측소의 이동속도를 산출하고자 한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 양산 상시관측소의 지각이동 속도를 계산한 결과, 수평방향으로  $\pm 0.3 \sim \pm 0.5 \text{mm/year}$ , 수직방향으로는  $\pm 1.6 \text{mm/year}$ 의 표준편차를 가지는 이동 속도를 결정할 수 있었다.
2. 정밀절대측위 결과의 통계적인 처리를 통해 양산 상시관측소가  $48.5 \text{mm/year}$ 의 속도로 방위각  $126^\circ$ 의 남동쪽 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있었다. 수직방향 이동의 경우 수평방향과 같은 뚜렷한 방향성을 발견할 수 없었으나 미소하게 융기하고 있음을 확인할 수 있었다.
3. 양산 상시관측소는 주변상시관측소와 비슷한 이동 방향을 보였으며, 이동속도의 경우 양산단층계에 속한 양산과 부산상시관측소가 다른 상시관측소보다 다소 큰 이동속도를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

향후, 단층지역의 GPS 관측 자료에 대한 지속적인 자료처리와 함께 통계적인 분석이 이루어진다면 지각변동의 모니터링이 가능할 것이며, 이러한 연구결과들은 단층지역의 지구물리 해석에 기초자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

강준목, 박준규, 이최구, 이용욱 (2010), 온라인 GPS 자료처리 서비스의 정확도 분석, 한국측량학회지, 제 28권, 제 1호, 한국측량학회, pp. 13-21.

김경수 (2009), 위성측지기준점의 정밀위치해석에 의한 지각변동 모니터링, 충남대학교 박사학위논문, pp. 128-130.

김인수 (1992), 새로운 동해 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동, 한국지질학회지, 한국지질학회, Vol. 28. No. 1, pp. 84-109.

박관동, 임형철 (2004), GPS 관측을 통한 한반도 서해안 지역의 해수하중에 의한 지각변위 검출 가능성 조사, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 한국측량학회, pp. 33-38.

신영홍, 박종욱, 박필호 (2006), 한반도 남부 모호면의 변형 구조, 한국지구과학회지, 한국지구과학회, 제 27권, 제 6호, pp. 620-642.

장해남, 이종운 (2007), 우리나라의 지진현황 및 국외 지진피해 사례, 대한토목학회지, 대한토목학회, Vol. 45. No. 4, pp. 133-139.

조재명, 윤홍식 (2007), GPS를 이용한 한반도 지각변동 파라미터 계산, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 한국측량학회, pp. 77-80.

Vy Quoc Hai, Lee, Y. W. and Kang, J. M. (2000), GPS 반북관측에 따른 캄로단층의 최근 지각변동 평가, 한국측량학회지, 제 18권, 제 1호, 한국측량학회, pp. 19-23.

Chough, S. K., Kwon, S. T., Ree, J. H., and Choi, D.K. (2000), Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view, *Earth Science Reviews*, Vol.52, pp. 175-235.

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. and Meindl, M. (2007), Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern, pp. 183-195.

Hamdy, A. M., Park, P. H., and Lim, H. C. (2005), Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data, *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.77-82.

Jin, S., Li, Z. C., and Park, P. H. (2006), Seismicity and GPS constraints on crustal deformation in the southern part of the Korean Peninsula, *Geoscience Journal*, 10(4), pp. 491-497.

McCarthy, D. D. (1996), IERS Technical Note 21: IERS Conventions, *Central Bureau of IERS*, Observatoire de Paris, p. 95.

Smalley R. Jr, Ellis M. A., Paul J., and Van Arsdale R. B. (2005), Space geodetic evidence for rapid strain rates in the New Madrid seismic zone of central USA, *Nature*, Vol. 435, pp. 1088-1090.

Tnaka Y., Saita H., Sugawara J., Iwata K., Toyoda T., Hirai H., Kawaguchi T., Matsuzaka S., Hatanaka Y., Tobita M., Kuroishi Y. and Imakire T. (2007), Efficient Maintenance of the Japanese Geodetic Datum 2000 Using Crustal Deformation Models-Patch JGD & Semi-Dynamic Datum, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, Vol. 54, pp. 49-59.