

# GPS 측량에 의한 해안구조물의 정적변위측정에 관한 연구 A Study on the Static Deformation Monitoring of the Offshore Structures by GPS Survey

이창경\* · 김창우\*\*

Lee, Chang Kyung · Kim, Chang Woo

## 要 旨

본 연구는 구조물 안전진단 기초자료인 변위를 GPS를 이용하여 측정하는데 목적이 있으며, 실험대상인 금강 남측 도류제상에 설치한 2점의 변위관측점을 약 1년간 4개월 주기로 4셋의 GPS 장비로 측정하여 그 3차원적 정적변위를 측정하였다. 또한, 보다 신뢰성 있는 해안구조물의 변위측정기법을 모색하기 위하여 기준점과 좌표계의 선정에 따른 변위관측정확도와 GPS관측변위의 신뢰성을 점검하는 방안에 대하여 검토하였다.

## ABSTRACT

The objective of this study is to measure deformation of the structures for stability checks by GPS survey. In this study, 2 points on south side dike of Keum River were measured by 4 sets of GPS(SR9500, Leica) every 4 months for a year, and 3-dimensional displacements of the points were acquired. In order to seek more reliable deformation measurement methods for the offshore structure by GPS, the accuracy of GPS survey with various control points configuration and checking system for detecting unrealistic measurements are also discussed.

## 1. 서 론

구조물의 변위는 기초지반 또는 구조물자체의 응력이 외력을 감당하지 못하거나, 또는 허용응력보다 작은 외력이 지속적으로 구조물에 작용한 총체적 결과로 나타나는 구조물의 외형적인 반응이므로 안전성검사에 있어 기본적인 조사항목이다. 해안구조물은 육상구조물에 비해 설계시 기초지반, 외력 등에 대한 조사와 시공시 품질관리를 엄밀하게 수행하는데 어려움이 많다. 따라서, 해안구조물은 그 기초지반의 지내력이 상부구조물이 가하는 하중을 지지할 수 없거나, 구조물자체의 훼손으로 인한 기능상실내지는 파괴를 방지하기 위하여 설계시 안전율을 충분히 고려할 뿐만 아니라, 시공 중에는 물론이고 준공 후에도 철저한 안전검사가 주기적으로 시행되어야 할 필요가 있다.

토사나 사석으로 축조되는 도로기반부나 방조제의 변위는 대부분 지반의 침하나 압밀에 의해 발생되며, 이때

의 침하량은 현장에 침하판을 설치하여 측정하여야 한다. 본 조사대상지역인 새만금간척지의 사석 및 준설해성토로 축조되는 방조제에도 공구별로 침하판이 설치되어 운용되어 왔으나, 폭풍에 의해 유실되거나 공사중에 훼손되는 일이 잦아 의도된 역할을 못하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 해상구조물은 육상구조물과 달리 그 가까운 주변에 고정된 기준점을 확보하기 어렵고, 대부분 장구간에 축조되는 대형 구조물이라 재래식 계측기나 측량기에 의해 변위측정이 쉽지 않고, 균질의 측정값을 얻기 어렵다.

최근에 항법, 측지 및 측량분야에 광범위하게 이용되고 있는 위성측위시스템을 이용하면 수 mm의 정밀도로 위치측정이 가능하므로, 해상구조물의 정적변위를 3차원적으로 파악하기 위한 연직방향 및 평면변위 측정에 GPS를 적용하면 신속하고 정확한 변위값을 획득할 수 있다.

국내에서의 GPS에 의한 변위측정분야의 연구로 이진덕(1998)은 흙담에 대해 계절과 수위가 다른 시기에 4차에 걸친 GPS관측으로 구조물의 변형을 모니터링한 결과 소규모 지역에서 임의 기준점을 원점으로 하는 지역수평좌표계(Local Level Coordinates System)를 이용하면

\*군산대학교 토목환경공학부 교수

\*\*군산대학교 대학원 석사과정

WGS84좌표계에 비해 변형의 방향과 크기를 용이하게 파악할 수 있음을 제시하였다. 박필호(1999)는 3축방향으로 이동가능한 GPS변위측정 시험대의 실제이동량을 GPS측정으로 얼마나 정확하게 감지하는지에 대한 실험적 연구에 수원 IGS 기준점으로부터 안산의 시험대까지의 기선거리가 16 km인 경우 평면위치는  $\pm 2$  mm, 높이는  $\pm 8$  mm 이내의 표준오차로 변위를 검출할 수 있음을 밝힌바 있다. 또한 Vy Quec Hai(2000)은 충남대와의 공동연구에서 GPS에 의해 Vietnam의 Cam Lo 단층의 수평 및 수직변화량을 관측한 바 있다.

본 연구는 고정점을 기준으로 임의지점의 위치를 GPS에 의해 주기적으로 측정하여 그 위치좌표에 변화가 있으면 그 좌표차이를 그 지점의 변위량으로 간주한다는 전제아래 다음과 같은 방법으로 수행되었다.

일반적으로 구조물의 변위는 단기간에 일어나지 않고, 그 양도 구조물의 크기에 비해 매우 작기 때문에 GPS의 변위측정신뢰성에 대한 선행 연구없이 곧바로 현장에 적용하여 변위측정을 시도하는 것은 측정된 변위량을 얼마나 신뢰할 것인가를 판단할 기준이 없기 때문에 바람직스럽지 못하다(박필호, 1999). 즉, GPS를 구조물의 변위계측 및 방재분야에 이용하기 위해서는 그에 앞서 GPS의 변위측정능력검증이 선행되어야 한다. 본 연구에서도 변위측정에 사용할 GPS 장비의 변위측정신뢰성을 확인하기 위한 실험을 먼저 하였다.

금강 남측도류제상에 표시한 변위측정점들을 정지 DGPS(Static Differential GPS) 측량에 의해 4개월 주기로 3번 측정하였으며, 사용된 GPS 수신기는 4쌍의 12채널 2주파 수신기이다. 위와 같은 GPS 측량에 의한 광역 변위측정 시스템의 정확도를 분석하기 위하여 관측망 형태에 따른 기선해석의 정확도와 좌표변환 방법별 위치정확도를 비교 분석하였다.

먼저, GPS 관측망에 포함된 관측점의 수, 망의 크기와 모양이 GPS 측위 정확도에 미치는 영향을 조사하기 위해 변위측정점 주위의 삼각점만으로 GPS망을 구성한 경우와 상시관측소의 관측점을 포함시켜 GPS망을 구성한 경우의 기선변화와 표준오차를 비교 분석하였다. 또한 변위는 WGS 84 좌표계를 기준한 값보다 평면 및 연직방향 성분으로 표현된 값이 더 유용하므로, 본 연구에서는 GPS 망조정으로 구한 고정점과 변위점의 WGS 84좌표를 지역수평좌표계(LLC)와 한국평면직교좌표계(KPCS)로 변환하여 고정점 및 변위점의 변위추이를 분석하였다. 아

울러, 본 연구의 GPS 변위측정 신뢰성 검토를 위해 2가지 방법을 구상하였다. 첫째, 변위가 없다고 보는 삼각점을 변위점으로 선정하여 그 삼각점의 변위 유무를 근거로 관측 결과의 신뢰성을 검토하였다. 둘째, 남측 도류제상의 변위관측점 2점에 대해서 매 관측시마다 직접수준 측량을 실시하여 구한 높이차와 GPS 측량으로 구한 높이차를 비교하여 GPS 관측의 정확도를 검증하였다.

## 2. 지구좌표계와 지역수평좌표계

GPS의 공식적인 기준좌표계는 지구중심고정좌표계(ECEF)인 WGS84이므로 GPS에 의해 측정된 위치는 일차적으로 WGS84좌표계로 표시된다. 그러나, 지표면상 변위관측의 경우 관측값(위치좌표, 또는 변위량)을 지구좌표계(WGS84)에 기준한 좌표보다는 경위도좌표계, 평면좌표계, 또는 다른 지표면측량값과 조합된 벡터량으로 나타내는 편이 그 변위를 이해하기 쉽다. 이와 같은 지역좌표계는 지구중심3차원직교좌표계가 아니기 때문에 좌표변환이 필요하다. WGS84좌표계와 경위도좌표계사이의 변환은 측지학이나 GPS 관련문헌(Hofmann-Wellenhof, 1997)을 참고하기 바라며, 본 연구에서는 WGS84좌표계를 변위의 방향과 크기를 가장 쉽게 이해할 수 있는 지역수평좌표계(Local Level Coordinates)로 변환하는 관계식에 대하여 살펴보기로 한다.

지구좌표계(Global Coordinates)는 3차원직교좌표계이므로, 지표상 점의 위치를 3축의 성분(X, Y, Z)으로 표기하고 있으나, 벡터인  $\underline{X}$ 로 표기하면,  $\underline{X}_i(X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $\underline{X}_j(X_j, Y_j, Z_j)$ 는 지구표면상의 두 점 P, P를 나타낸다. 이 두 점을 잇는 벡터를 지구좌표계로 나타내면 아래 식 (1)과 같다(Hofmann-Wellenhof, 1997).

$$\underline{X}_{ij} = \underline{X}_j - \underline{X}_i \quad (1)$$

이 벡터를 지표상의 점 P에 접한 지역수평좌표계에서는  $x_{ij}$ 로 표기하기로 한다. 지표상의 점 P에 접한 지역수평좌표계의 3축  $n_i, e_i, u_i$ 는 북쪽, 동쪽, 연직방향을 가르키므로 이 좌표계를 ENU좌표계로, Topocentric Coordinates Frame(A. Kleusberg, 1996), 또는 Local Geodetic Horizon Coordinates System(이진덕, 1998)이라 부르기도 한다. 그림 1을 보면,  $x_{ij}$ 는  $\underline{X}_{ij}$ 를 지역수평좌표축  $n_i, e_i, u_i$ 에 투영하여 다음 식 (2)와 같이 구할

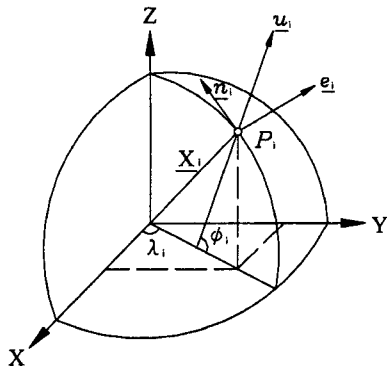


그림 1. 지구좌표계와 지역수평좌표계

수 있다.

$$\underline{x}_{ij} = \begin{bmatrix} n_{ij} \\ e_{ij} \\ u_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_i \cdot X_{ij} \\ e_i \cdot X_{ij} \\ u_i \cdot X_{ij} \end{bmatrix} = \underline{D}_i^T X_{ij} \quad (2)$$

단,

$$\underline{D}_i = \begin{bmatrix} -\sin\phi_i \cos\lambda_i & -\sin\lambda_i & \cos\phi_i \cos\lambda_i \\ -\sin\phi_i \sin\lambda_i & \cos\lambda_i & \cos\phi_i \sin\lambda_i \\ \cos\phi_i & 0 & \sin\phi_i \end{bmatrix}$$

### 3. 관측 및 자료처리

#### 3.1 GPS의 위치측정 정확도 실험

본 연구에 사용된 GPS H/W 및 S/W는 Leica SR9500 센서, AT302(또는 AT303)안테나, CR344 컨트롤러, 그리고 SKI(Ver. 2.3)로 구성된 2주파, 12채널 수신기로 코드와 반송파를 모두 수신할 수 있다. 장비 제작자의 사용설명서에 제시된 이 장비의 기선해석 정확도는 반송파를 이용하는 DGPS 정지측위의 경우  $\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ 이다. 그림 2와 같이 설치된 측점 3지점의 상대적 위치를 Total Station(TC2002, Wild)으로 정확히 측

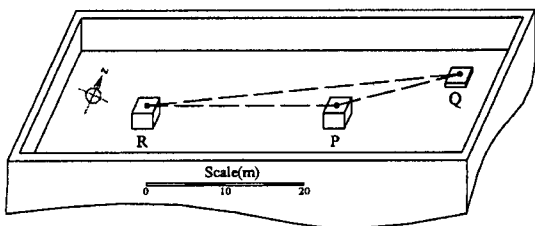


그림 2. GPS 변위측정실험 측점배치도

정하고 다음과 같이 GPS측량을 실시하여 각 측점의 WGS84좌표와 지역수평좌표계, 한국평면직교좌표, 그리고 각 측점간의 기선거리를 구하여 본 장비의 정확도를 점검하였다.

<제1일>

① 기준점 R 및 변위측정점 P에 각각 Reference 및 Rover 수신기를 세워 80분간 관측. 이때의 P를 P<sub>1</sub>이라 표기.

② ①의 상태에서 변위관측점 P의 높이를 0.078 m 낮춘 후 80분간 관측. 이때의 P를 P<sub>2</sub>이라 표기.

③ 변위관측점 Q에 Rover 수신기를 옮겨 세운후 80분간 관측. 이때의 Q를 Q<sub>1</sub>이라 표기.

④ ③의 상태에서 변위관측점 Q의 높이를 0.046 m 낮춘 후 80분간 관측. 이때의 Q를 Q<sub>2</sub>이라 표기.

<제2일>

제1일의 ①~④ GPS관측과정 반복하여 이때의 변위관측점 P, Q를 각각 P<sub>1</sub><sup>2</sup>, P<sub>2</sub><sup>2</sup>, Q<sub>1</sub><sup>2</sup>, Q<sub>2</sub><sup>2</sup>라 표기. 이때에 P<sub>2</sub><sup>2</sup>는 P<sub>1</sub><sup>2</sup>보다 0.046 m, Q<sub>2</sub><sup>2</sup>는 Q<sub>1</sub><sup>2</sup>보다 0.130 m 낮게 설치했음.

이와 같이 반복관측한 GPS수신자료를 SKI 프로그램을 이용하여 기선해석, 망조정, 좌표변환과정을 거쳐 변위관

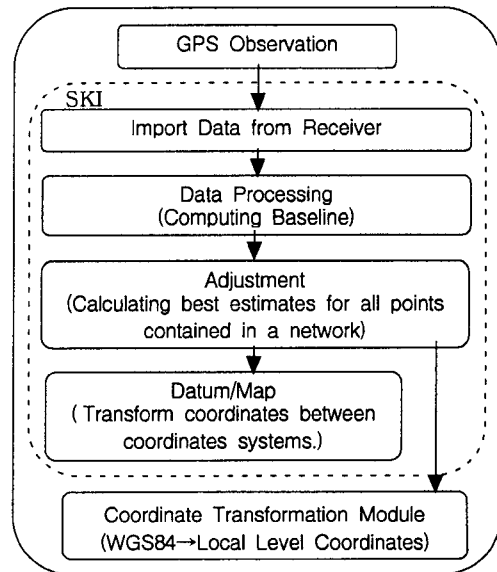


그림 3. GPS 자료처리 흐름도

측점의 WGS84좌표, 지역수평좌표, 한국평면직교좌표를 구하고, 본 연구에서 사용하는 GPS 장비의 변위측정 정확도를 분석하였다. 그림 3은 SKI(Leica, 1997)에 근거하여 본 연구에서 적용한 GPS 자료처리 흐름도이다. 표 1은 SKI의 Data Processing과정에서 적용한 파라미터이다.

GPS측량 자료처리과정 중 조정은 최소제곱법에 의해 망에 포함된 측점의 정확도를 계산하는 한편, 망에 포함된 과대오차를 검출할 목적으로 그림 4에 기술한 차례로 수행되었으며, 자유망조정의 과대오차검출시 신뢰수준은  $2\sigma(95\%)$ 를 적용하였다.

### 3.2 금강 남측 도류제의 변위측정

해안의 방조제나 도류제는 조류와 파랑의 영향을 끊임

표 1. GPS 측량 자료처리시 적용한 파라미터

파라미터	적용
Cut-off angle	15° deg
Tropospheric model	Hopfield
Ionospheric model	No model
Solution type	Standard
Ephemeris	Broadcast
Data used	Use Code and Phase
Phase Frequency	Automatic
Code Frequency	Automatic
Limit to resolve ambiguities	20 km
Priori RMS	10 mm
Sampling rate for static	Use all sec
Phase processing	Automatic
Cycle slip detection	Phase check & loss lock flag
Phase measurement RMS	10 mm
Update rate for kinematic	5 epoch
Min. time to fix amb. -L1 only	9 minute

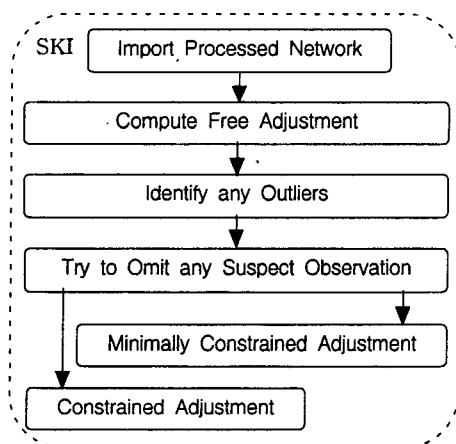
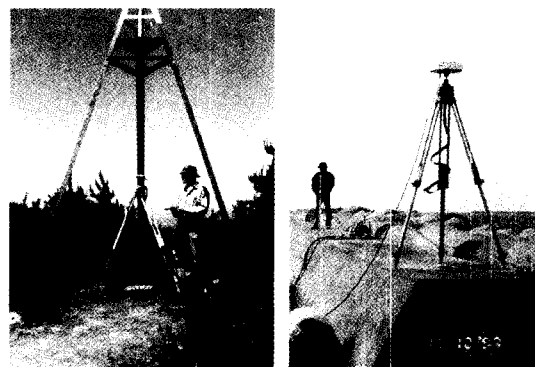


그림 4. 망조정 과정(SKI, Leica, 1997)

없이 받기 때문에 시공 중에는 물론이고 준공 후에도 지속적으로 변위가 발생할 확률이 크다. 따라서, 본 연구에서는 변위측정대상으로 전북 군산시 금강 남측 도류제 서단 상면에 변위관측점 2점(약 680 m 간격)을 축설하였고, 군산과 부안 지역의 1, 2등 삼각점 중 5점(부안 11, 부안 21, 군산 11, 군산 22, 군산 23)과 국내 IGS 상시관측소인 대전 한국천문대(DAEJ)와 수원의 국립지리원(SUWON)을 고정점으로 이용하였다. 장기적 변위관측에서는 기준점으로 채택한 국가삼각점이나 IGS상시관측소 기준점도 이동이 있을 수 있다. 그러나 IGS 상시관측소 기준점에 대하여는 IGS에서 신뢰할 수 있는 위치좌표를 계속 산출하여 주므로 IGS 상시관측소 기준점을 변위측량시 기준점으로 채택하면 기준점자체의 움직임도 파악할 수 있다. 또한, 군산 401 삼각점은 고정점으로 간주할 수 있으나, 변위측정점으로 간주하고 자료처리하여, 이 측점의 변위량은 GPS 변위측정의 신뢰도를 평가하는 하나의 지표로 이용하였다. 그림 5는 이와 같이 선정된 GPS관측 기준점 및 변위측정점에서의 GPS 관측광경이고, 그림 6은 그 위치도이다.

선정된 관측점들에 대해 1999년 12월~2000년 9월까지 약 4개월 주기로 4차례 GPS 관측을 실시하였다. 관측방식은 정지측위로 4셀의 Leica SR9500수신기 중 3셀은 기준점에 설치하여 계속 관측하고 1셀의 수신기는 변위관측점을 순차로 이동하며 약 2시간 내지 3시간씩 수신하였다. 이와 같이 본 연구에서 직접 수신한 GPS 자료와 국내 IGS 센터(DAEJ와 SUWON)의 관측데이터(RINEX 포맷)를 합성하여 GPS 관측망을 구성하였다.



(A) 군산 22 삼각점

(B) 변위측정점 KB-2

그림 5. GPS 측량 - 기준점 및 변위측정점

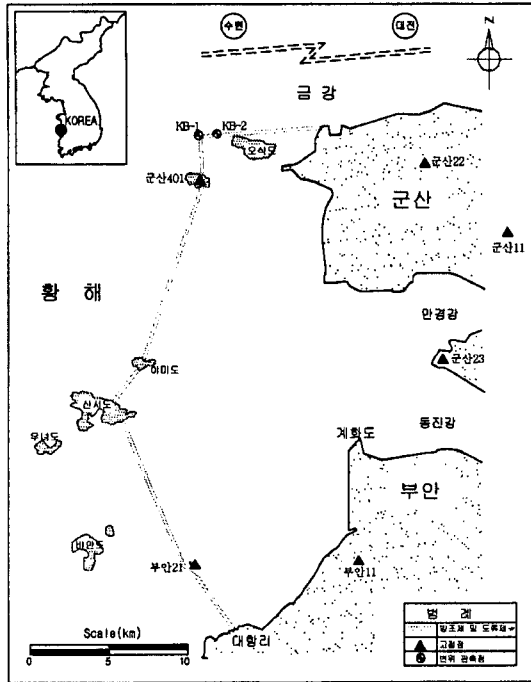


그림 6. GPS측량 기준점 및 변위관측점 위치

자료처리과정 중의 기선해석시 위성과 측정점간의 거리 측정에는 코드와 위상신호를 모두 사용하였고, 위성레도 자료는 방송궤도력을 사용하였다. 또한, 4차에 걸친 GPS 관측 데이터들로부터 일관성있는 성과를 획득하기 위하여 데이터 취득과 처리에 동일한 과정과 표 1의 파라미터를 적용하였다.

#### 4. 자료처리결과 및 분석

##### 4.1 GPS의 위치측정 정확도 실험결과

군산대학교 산업관 옥상에 측정한 GPS 기준점(R) 주위에 2점의 변위관측점(P, Q)를 표지하고, GPS 수신기 한 셀은 R에서 계속관측하고, 나머지 한 셀의 수신기는 측정점 P 및 Q에서 3.1절에서 기술한 방법으로 GPS측량하여 획득한 GPS측량자료를 SKI(Leica, 1997)를 이용하여 그림 3과 같은 처리과정을 거쳐 기준점(R)과 변위측정점(P, Q)의 WGS84좌표를 구하였으며, 표 2는 이때의 각 측정점의 표준오차이다. 기선길이가 최대 37m로 소구역에 위치한 측정들이지만 그 표준오차는 0.0006 m 이내로 만족스러운 결과를 보였다.

기준점(R)과 두 변위측정점(P, Q)을 잇는 벡터를

표 2. GPS측량 표준오차(고정점 R, WGS84)

제1일 관측		제2일 관측	
측점	표준오차(m)	측점	표준오차(m)
$P_1^1$	$\pm 0.0006$	$P_1^2$	$\pm 0.0005$
$P_2^1$	$\pm 0.0005$	$P_2^2$	$\pm 0.0005$
$Q_1^1$	$\pm 0.0006$	$Q_1^2$	$\pm 0.0006$
$Q_2^1$	$\pm 0.0006$	$Q_2^2$	$\pm 0.0006$

WGS84, 지역수평좌표계, 한국평면직교좌표계의 3축 성분으로 산출한 결과가 표 3이다. WGS84좌표계로 표기한 좌표는 변위측정점의 변위가 연직하방으로만 발생하였지만, 주지하다시피 그 변위가 X, Y, Z 방향으로 분해되어 나타나 현실적인 변위값을 가능하기 난해하다. 단, 각 측정점의 변위 전 위치와 변위 후 위치를 잇는 벡터의 크기는 변직방향 총변위량과 일치하여야 하는데 제1일에 측정된  $P_2^1 P_1^1 = 0.079$  m,  $Q_2^1 Q_1^1 = 0.082$  m, 제2일에 측정된  $P_2^2 P_1^2 = 0.045$  m,  $Q_2^2 Q_1^2 = 0.126$  m로 실제 GPS측정시 설정한 변위와 P점에서는 1 mm, Q점에서는 4 mm의 차이를 보였다.

한편, 변위측정점 P, Q의 수평방향(n, e축)의 변위는 없었으나 지역수평좌표계로 변환한 P, Q점의 좌표차이는 제1일 관측에서 최대 2 mm의 변위를 보였고, 연직방향(u축)의 변위는 제1일 관측의 Q점에서 -0.086 m의 연직하방 변위가 있었으나 GPS측정값은 -0.081 m로 최대 5 mm 차이를 보였다.

위에서 분석한 측정점(P, Q)의 WGS84좌표를 주위의 삼각점을 기준으로 하여 SKI에서 한국평면직교좌표계(KPCS)로 변환한 측정점의 좌표는 수평방향에서 최대 2 mm의 오차를 보였고, 제2일의 연직방향 Q점의 실제변위는 -0.130 mm이나 GPS관측결과는 -0.126 mm로 최대 4 mm의 차이를 보였다.

표 4는 동일 측정점에 대한 제1일 관측좌표와 제2일 관측좌표를 비교한 결과로 WGS좌표계좌표의 차이가 LLC나 KPCS좌표로 구할 때 보다 차이가 작았다. 특히, LLC와 KPCS의 경우 연직방향에서는 하루의 시차를 두고 관측하는 경우에 P점과 Q점에서 7 mm 차이를 보여, 동일 측정점을 하루에 측정하는 경우(5 mm)보다 크게 나왔다.

즉, 동일 지점에 대한 GPS관측에서 WGS84좌표로 측정된 변위는 우리가 평소에 사용하는 평면직교좌표계상의 변위성분을 제시하여 주지는 않지만 다른 두 좌표계

표 3. 기준점(R)과 변위점(P, Q) 위치와오차

(A) 제1일 관측

좌표계		벡터성분(m)			벡터성분 차이(m)*		
		$P_1^1 - R$	$P_2^1 - R$	$Q_1^1 - R$	$Q_2^1 - R$	$P_2^1 - P_1^1$	$Q_2^1 - Q_1^1$
WGS84	X	-20.532	-20.493	-30.202	-30.161	0.038	0.040
	Y	-11.637	-11.687	-21.359	-21.411	-0.050	-0.052
	Z	-4.625	-4.672	-2.923	-2.972	-0.048	-0.049
LLC	$n_i$	5.465	5.467	2.901	2.902	0.002	0.001
	$e_i$	-23.418	-23.417	-36.980	-36.979	0.001	0.001
	$u_i$	0.341	0.420	0.978	1.059	0.078	0.081
KPCS	x	23.400	23.399	36.971	36.969	-0.001	-0.000
	y	-5.542	-5.544	-3.023	-3.024	-0.002	-0.000
	h	-0.341	-0.420	-0.978	-1.059	-0.079	-0.082

\* $P_2^1$ 는  $P_1^1$  보다 0.078 m,  $Q_2^1$ 는  $Q_1^1$  보다 0.086 m 낮음.

(B) 제2일 관측

좌표계		벡터성분(m)			벡터성분 차이(m)		
		$P_1^2 - R$	$P_2^2 - R$	$Q_1^2 - R$	$Q_2^2 - R$	$P_2^2 - P_1^2$	$Q_2^2 - Q_1^2$
WGS84	X	-20.530	-20.508	-30.199	-30.137	0.022	0.062
	Y	-11.643	-11.672	-21.363	-21.445	-0.028	-0.082
	Z	-4.628	-4.656	-2.927	-3.000	-0.028	-0.073
LLC	$n_i$	5.465	5.466	2.902	2.901	0.001	-0.001
	$e_i$	-23.42	-23.419	-36.980	-36.980	0.001	-0.000
	$u_i$	0.348	0.394	0.984	1.111	0.046	0.127
KPCS	x	23.402	23.402	36.971	36.971	-0.001	-0.000
	y	-5.542	-5.543	-3.024	-3.022	-0.001	0.002
	h	-0.348	-0.394	-0.984	-1.110	-0.045	-0.126

\* $P_2^2$ 는  $P_1^2$  보다 0.046 m,  $Q_2^2$ 는  $Q_1^2$  보다 0.130 m 낮음.

표 4. 측정점 위치벡터성분의 관측일별 차이

좌표계		좌표차이(m)			
		$P_1^2 - P_1^1$	$P_2^2 - P_1^1$	$P_1^2 - P_2^1$	$P_2^2 - P_2^1$
WGS84	X	0.001	-0.015	0.002	0.024
	Y	-0.004	0.018	-0.002	-0.032
	Z	-0.002	0.017	-0.004	-0.027
	$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$	0.0046	0.0289	0.0049	0.0483
LLC	$n_i$	-0.000	0.001	-0.001	0.001
	$e_i$	0.002	0.003	-0.000	-0.001
	$u_i$	-0.007	-0.026	-0.006	-0.052
KPCS	x	0.002	0.003	0.001	0.001
	y	-0.000	0.001	-0.001	0.002
	h	-0.007	0.027	-0.007	-0.051

로 변환하였을 때보다 더 오차가 작았다. 반면에, 지역수평좌표계(LLC) 및 한국평면직교좌표계(KPCS)는 수평 및 연직방향에서 WGS84 좌표계보다 약 1 mm 정도 오차가 크게 나왔으나, 변위방향이 각종 공사도면의 좌표계와 동

일하여 편리하다고 사료된다. 단, 이진덕(1998)과 박필호(1999)가 밝힌 바와 같이 GPS에 의해 연직방향변위를 측정하는 경우 그 오차는 수평방향오차의 약 2배에 가까우며, 이 오차는 변위측정이 일정 시간을 주기로 시행될

경우 더 크게 나왔다.

## 4.2 금강 남측도류제의 변위측정 분석

### 4.2.1 GPS망구성에 따른 정확도

GPS측량망은 관측한 기준점의 배치에 따라 그 모양이 달라지며, GPS 측량망에 따라 변위측정점의 좌표도 달라질 수 있다. 일반적으로 기선해석만으로 구한 경우보다는 망조정에 의해 구한 좌표의 정확도가 좋으며, 기준점과 측정점의 거리가 가까울수록 측정점의 위치정확도가 좋아지는 것으로 알려져 있다(Leica 1997, 이진덕 1998, 박필호 1999). 본 연구에서도 고정점으로 간주한 국가삼각점과 변위측정점을 포함한 망을 구성하여 GPS 측정을 시작하였으나, 1년여의 4차례 GPS 측량이 진행되는 동안 부안 11 삼각점은 접근이 용이하지 못하여 2차 관측부터 제외되었고, 군산 22 삼각점은 그 상부에 설치된 장애물에 의해 수신환경이 불량하여 4차 관측부터 군산 11 삼각점으로 교체되어 일관된 GPS 측량망을 유지하지 못하였다(그림 7). 이와 같은 GPS 측량망의 변화는 균일한 품질의 성과획득에는 불리하지만, 장기적인 안목에서 측정의 변위를 정확하게 측정하기 위해서는 불가피 하였다.

망조정기선거리의 변화와 표준오차를 비교 분석하기 위하여 국내 IGS 상시관측소를 기준점으로 간주한 경우와 실험지구내 군산 22 삼각점을 기준점으로 하여 기선 해석하였을 때의 표준오차를 그림 7에 수평방향은 오차 타원으로, 높이 방향은 막대 그래프로 나타내었다.

실험지구와 약 100 km 떨어져있는 대전GPS상시관측소(DAEG) 기준점을 1점 고정 망조정하여 각 측정(기준점 3점, 변위측정점 3점)의 WGS84좌표를 구할 때의 수평 및 높이 표준오차(그림 7의 실선 오차타원) 평균은  $\pm 14.4$  mm이었고, 대전GPS상시관측소(DAEG)를 망에서 제외하고 군산22 삼각점을 고정점으로 하여 망조정한 경우(측점들간 최대거리는 약 29 km)에 표준오차(그림 7의 점선 오차타원)의 평균값은  $\pm 9.9$  mm로 4.5 mm 줄어든 것을 볼 수 있다. 즉, 앞에서 기술했다시피 GPS를 이용한 위치측정의 경우 단기선이 되도록 망을 구성하면 장기선 망보다 우수한 정확도를 기대할 수 있다. 한편, 박필호(1999)의 경우 기준점과 측정점의 거리가 16 km일 때 수평방향 표준오차가  $\pm 2$  mm, 높이방향의 표준오차가  $\pm 8$  mm인 것은 기준점과의 거리가 가까울 뿐만 아니라, 1 측점에 대한 반복관측 표준오차를 구했기 때문이다.

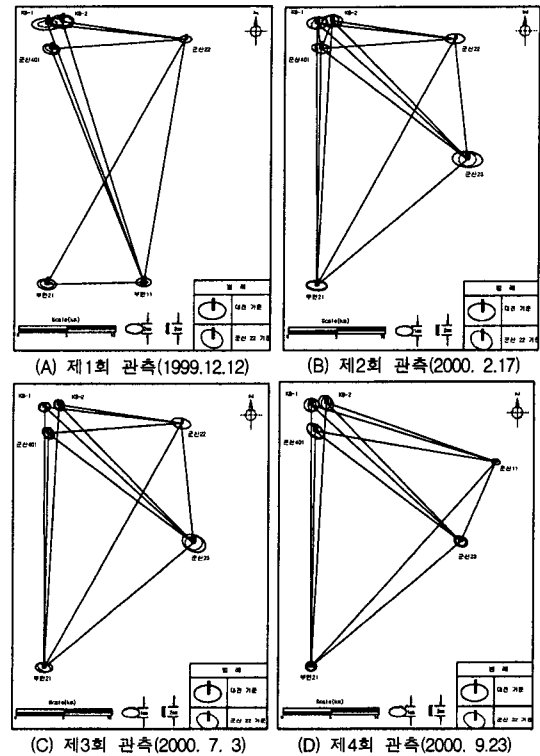


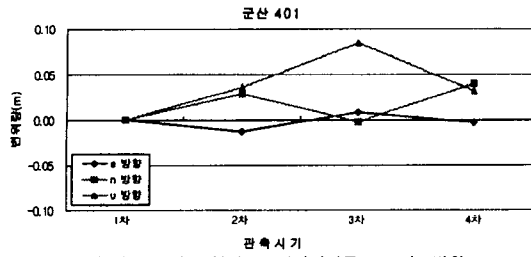
그림 7. GPS 측량망도 및 망조정 오차

그림 7의 (A), (B), (C)는 군산 22 삼각점을 기준점으로 채택하였을 때의 망구성 및 표준오차이고, 그림 7의 (D)는 제 4차 관측시에 군산 22 삼각점을 군산 11 삼각점으로 교체한 이후의 망구성 및 표준오차를 보여주는 데, 이때에 모든 GPS관측점에서 오차타원이 줄어든 현상이 보이며, 이것은군산 22 삼각점위에 설치된 측량표지용 철구조물로 인하여 다중경로수신오차가 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

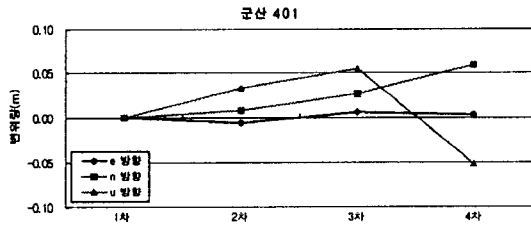
### 4.2.2 기준좌표계와 그 변환에 따른 정확도

GPS 관측 데이터를 처리하여 구한 측정점의 위치는 WGS84좌표계를 기준으로 계산된 성과들이므로 변위발생의 크기와 방향을 파악하는데 난해하다. 따라서, 본 연구에서는 부안 11, 부안 21, 군산 11, 군산 22, 군산 23 삼각점들을 기준점으로하여 군산 401 삼각점과 금강 남측도류제상의 변위측정점 두 점(KB-1, KB-2)의 좌표를 지역수평좌표계(LLC)와 한국평면직교좌표계(KPCS)로 변환하였다.

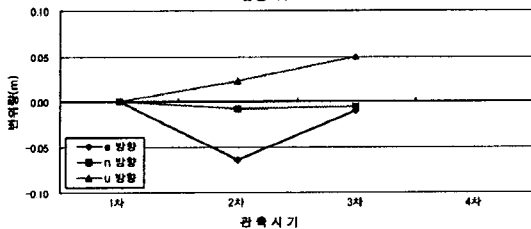
WGS84좌표계로부터 지역수평좌표계(LLC)로의 변환은 식 (2)를 이용하였다. 이때에 입력좌표는 기선해석 후



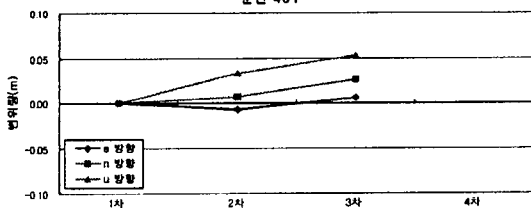
(A) 망조정 전 - 부안 21 삼각점기준으로 좌표변환



(B) 망조정 후 - 부안 21 삼각점기준으로 좌표변환



(C) 망조정 전 - 군산22 삼각점기준으로 좌표변환



(D) 망조정 후 - 군산22 삼각점기준으로 좌표변환

그림 8. 고정점의 변위추이(지역수평좌표계)

망조정 전 WGS84좌표와 망조정 후 WGS84좌표로 구분하고, 기준점은 변위측정점과 약 25 km 거리에 있는 부안 21삼각점과 약 14 km 거리에 있는 군산22삼각점을 사용한 경우로 구분하여 군산 401삼각점의 좌표를 변환하였다. 4차례의 GPS관측중 제1차 관측을 기준으로 그 이후 GPS관측으로 구한 좌표차를 도시하면 그림 8과 같다. 군산 401삼각점의 이동이 없었다고 가정하면 좌표변환의 기준점이나 GPS관측시기에 관계없이 지역수평좌표계의 e, n, u축 변위는 없어야 하나, 그림 8(A)의 u축의 변위는 0.07m로 나타났다. 이와 같은 오차는 표 3에서 보인 군산대학 산업관에서 실시한 시험관측시의 오차

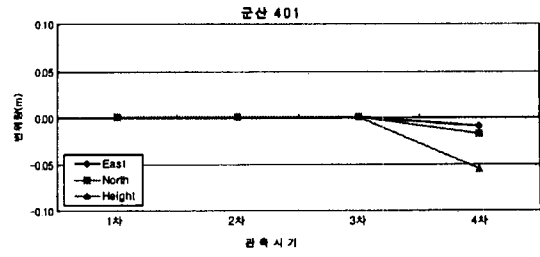


그림 9. 고정점의 변위추이(한국평면직교좌표계)

0.007 m에 비해 10배의 오차이다. 즉, 기준점과 측정점과의 거리에 비례하여 지역수평좌표계로 나타낸 측정점의 위치오차는 증가한다고 할 수 있다.

한편 그림 8의 (A), (C)와 (B), (D)를 보면 망조정 후 좌표를 좌표변환 입력좌표로 사용한 경우에 관측시기 별 고정점의 변위가 e, n, u 축에서 일관성 있는 패턴을 보일 뿐만 아니라, 절대값도 작았다. 즉, 지역수평좌표계로 변위측정을 하더라도, 기준점 한 점을 기준으로 기선 해석하는 형태보다는 망을 구축하여 망조정을 하는 편이 보다 신뢰할 수 있는 GPS변위측정방법이라 사료된다.

SKI(Leica, 1997)의 Datum/Map모듈(그림 3)WGS84좌표계로부터 한국평면직교좌표계로의 변환방법으로 3D Helmert 변환인 고전적 방법, 지도투영법이나 타원체에 대한 정보없이도 좌표변환이 가능한 보간법, 고전법과 보간법의 절충형인 단계적 방법, 평면위치와 높이변환을 분리하여 처리하는 One Step방법을 제공한다. 본 연구에서는 기준점으로 이용한 삼각점이 매 측정마다 3점인 관계로 One Step방법을 채택하였다. 또한, SKI 좌표변환모델로는 Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas 모델을 제공한다. 본 연구는 좌표변환계수의 결정보다는 고정점을 기준으로 한 변위측정에 목적이 있으므로 권대원(1996)이 권고한 대로 Molodensky-Badekas 모델을 이용하여 WGS84좌표로부터 한국평면직교좌표로 변환하였다.

그림 9는 이와 같이 변환한 한국평면직교좌표를 이용하여 제1차 관측시의 군산 401 삼각점의 위치를 기준으로 그 이후 관측에서 나타난 변위를 표기한 그래프이다. 한국평면직교좌표계도 지역수평좌표계와 유사한 지역좌표계임에도 불구하고 그림 8의 지역수평좌표계와는 달리 제 1차, 2차, 3차 GPS 측량으로 구한 군산 401 삼각점은 변위를 보이지 않는 이상적인 측정결과를 보여준다. 단, 제 4차관측에서 x, y 축에서 2 cm, h축에서 6 cm의 갑작스런 변위가 발생한 것으로 나타났는데, 이는 군산



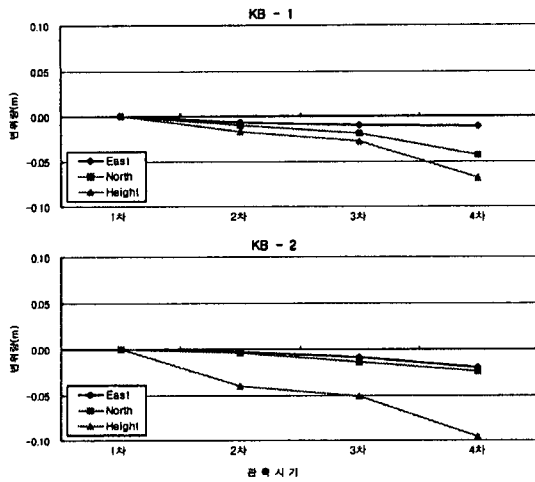


그림 10. 변위측정점의 변위추이(한국평면직교좌표계)

22 삼각점을 군산 11삼각점으로 교체한데 원인이 있는 것으로 보이며, 앞으로 계속될 GPS 변위측정에서 보다 정확한 원인을 찾을 수 있을 것이다.

본 연구에서 한국평면직교좌표계로 구한 고정점으로 간주할 수 있는 측점의 변위가 지역수평좌표계로 구한 변위보다 이상적인 양상을 보이는 원인은 아직 규명하지 못하였지만, 이후의 변위측정에는 한국평면직교좌표계를 이용하였다.

#### 4.2.3 도류제의 변위 및 GPS측량의 신뢰성

본 연구에서 측정점의 변위는 일정시간간격을 두고 GPS측량으로 구한 측정점의 좌표차로 전제하였고 이 좌표차가 실제의 변위인지를 2가지 방법을 통하여 검증하였다.

첫째, 자료처리시 사실상 고정점으로 볼 수 있는 군산 401 삼각점을 변위관측점으로 간주하고 망조정 하여 이 삼각점의 변위여부를 조사하였다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 군산 401 삼각점은 3차 GPS 변위측정결과 거의 움직임이 없는 반면에 그림 10에서 보듯이 금강 남측 도류제상의 변위관측점인 KB-1과 KB-2는 1차 관측과 비교하였을 때 수평변위와 침하가 일정한 비율로 증가하고 있는 것으로 미루어 보아 GPS 측량으로 구한 도류제의 변위측정값을 신뢰할 수 있었다.

둘째는 금강 남측 도류제상의 변위관측점 2점간의 높이를 관측시마다 직접수준측량하여 GPS 관측결과와 비교하는 것이다. 삼각점간 평균 기선이 30 km 이내인 본 연구에서 680 m 정도 떨어진 변위관측점들의 높이차

표 5. 측량방법별 변위관측점간 높이차

측정일	GPS측량 $H_{GPS}(m)$	레벨측량 $H_{LEVEL}(m)$	차이 $H_{GPS} - H_{LEVEL}(m)$
1999.12.12	0.177	0.172	+0.005
1999. 2.17	0.154	0.166	-0.012
2000. 7. 3	0.144	0.156	-0.011
2000. 9.23	0.140	0.159	-0.019

를 직접수준측량하여 GPS 측량으로 구한 두점 사이 높이차와 그 차이를 비교해 GPS 측량의 정확도를 검증하였다. 표 5는 직접수준측량과 GPS 관측에 의한 높이차이를 비교한 것으로 GPS 측량성과와 직접수준측량성과가 1~2 cm 정도의 차이가 있음을 보여주고 있다. 또한 매 관측 때마다 두 변위관측점 사이의 높이차가 점차 줄어드는 추세를 있음을 알 수 있다. 즉, GPS 측량은 장대규모이면서 변위측정점 가까이 고정점을 확보하기 어려운 방조제와 같은 해안구조물의 변위측정시스템으로 유용하며, 본 연구의 실험대상이 된 GPS 측량망(최대기선길이 30 km)에서의 연직방향 변위측정의 표준오차는 약  $\pm 1\sim 2$  cm로 평가되었다.

## 5. 결 론

GPS 측량에 의한 해안구조물의 정적변위측정에 관한 연구의 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 고정점에 대한 GPS반복관측의 결과 지역수평좌표계(LLC) 및 한국평면직교좌표계(KPCS)는 WGS84 좌표계보다 수평 및 연직방향에서 그 오차가 크게 나왔으나, 변위방향이 각종 공사도면의 좌표계와 동일하여 사용에 편리하다고 사료된다. 또한, GPS측량이 일정 시간을 주기로 시행될 경우 오차는 증대하였으며, 연직방향의 측위오차는 수평방향에 비해 약 2배 크게 나타났다.

2) GPS를 이용한 변위측정에 있어 기준점과 변위측정점이 가까울수록 보다 정확히 변위를 측정할 수 있었다. 또한, 기준점 한 점을 기준으로 기선해석하는 형태보다는 망을 구축하여 망조정을 하는 방식이 보다 신뢰할 수 있는 GPS변위측정방법이라 사료된다.

3) GPS 측량은 장대규모이면서 변위측정점 가까이 고정점을 확보하기 어려운 방조제와 같은 해안구조물의 변위측정시스템으로 유용하며, 본 연구의 실험대상이 된 지상삼각점과 해안 도류제상 변위측정점으로 구성된 GPS 측량망(최대기선길이 30 km)에서는 약  $\pm 1\sim 2$  cm의 표준

오차로 연직방향 변위를 측정할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 군산대학교 새만금환경연구센터의 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. 권대현, 윤홍식, 최재화, “7-매개변수 좌표변환에 의한 우리나라 측지좌표계와 WGS-84 좌표변환”, 한국측지학회지, 제13권, 제2호, pp. 117-124, 1995.
2. 박필호, 박종욱, 조정호, 전경수, 조성호, “GPS의 변위검출능력에 대한 실험”, 한국측지학회지, 제17권, 제2호, pp. 161-167, 1999.
3. 이진덕, “Kinematic GPS 측량기법에 의한 구조물의 변형 모니터링” 한국측지학회지, 제16권, 제1호, pp. 27-40, 1998.
4. Vy Quec Hai, 이용욱, 강준묵, “GPS 반복관측에 따른 캄로단층의 최근 지각변동평가”, 한국측량학회지, 제18권, 제1호, pp. 19-24, 2000.
5. Alfred Kleusberg & Peter J. G. Teunissen, “GPS for Geodesy”, Springer, chap. 1, 1996.
6. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, & J. Collins, “Global Positioning System - Theory and practice(4th ed)”, Springer Wien Newyork, Chap. 10, 1997.
7. Leica, “GPS - System 300, SKI documentation”, Leica Geosystem Inc., 1997.