

## 공학적 활용을 위한 천부지반 틸트 모니터링 Shallow-depth Tilt Monitoring for Engineering Application

이상규(Lee, Sang Kyu)

한국자원연구소

### 요약/Abstract

최근, 우리나라에서는 지반변형에 기인된 인공구조물의 대형 붕괴사고가 빈번했으며, 뿐만 아니라 산사태, 단층의 활동성 여부에 대한 논란 등 자연적 지반변형도 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 천부지반의 한 기준면의 2-축 틸트변화를 6개월간 연속관측하고 그 자료를 처리 분석함으로써 천부지반의 변형으로 부터 야기될 수 있는 재해의 사전예방기술을 마련할 목적으로 수행되었다.

연구소 부지내, 산사면에 설치한 2-축 틸트 센서를 이용하여 0.0001 arc.sec의 정밀도로 매 10분 마다 측정된 관측자료는 센서위치로부터 200m 유선연결된 연구실 내 PC에 interface를 통하여 실시간으로 기록 저장된다. 관측한 계수형 2-축 틸트자료는 공학적 활용을 염두에 두고 관련 기상자료들과 함께 처리 분석되었다.

6개월 간의 2-축 틸트 관측기간 중, 순(net) 틸트는 서쪽으로 10.06arc. sec, 남쪽으로 73.88arc. sec를 나타냄으로써 S7.75°W 방향으로 74.56arc.sec 기울어, 시간 당 평균 0.02arc.sec의 틸팅을 하였다. 관측위치에서의 지반이 이와 같이 빠르고 큰 틸팅을 하였음에도 불구하고 동-서 및 남-북성분의 틸트가 모두 일정한 값에 수렴해 가는 추세에 있으므로 본 위치는 공학적으로 안전한 것으로 판단하였다.

본 연구를 통하여 지표 경사방향 및 pore pressure 증가방향으로 분류되는 대, 소의 변형 event 들과 강우와의 관련성을 확인하였으며, 대기 온도변화의 영향에 의한 2-축 틸트 일변화는 온도변화에 평균 4.3시간 지연되어 나타나는 사실과, 대기압 변화와 변형과의 상관관계의 가능성 등도 제시하였다.

In recent yeaes, the collapses of man made structures have been encountered from time to time due to the deformation of the ground in korea. Furthermore, the possibilities of disasters from the ground deformation such as landslide and active fault are attracting our attention to the deformation monitoring. In this study, two-coordinate tilt which was monitored during six months in order to develop techniques for prevention of disasters from the ground deformation. The two-coordinate tilt which was detected by a tilt-sensor installed in shallow depth on the slope with the sensitivity of 0.0001 arc.sec in every 10 minutes was recorded continously to PC through the interface with 200-m line coonection. The observed digital tilt data. together with the relevant meteorological data were analyzed in reference to engineering application.

During the whole observation period of six months, the net tilt is 10.06 arc.sec to the west and 73.88 arc.sec to the south. Consequently the ground has a tilt of 74.56 arc.sec to the direction of  $S7.75^{\circ}W$  with average tilting of 0.02 arc.sec/hour. In spite of such fast and large tilting, it is interpreted in view of engineering aspects that the site is much safe from danger, since both East-West and North-South components of tilt converge as time goes by.

Two categories of deformational events are recognized ; one is toward the direction of surface slope and the other is to the direction of increased pore pressure. Tilts are acertain to have a close relation with precipitation of rain. The daily variation of two-coordinate tilt is delayed 4.3 hours in average after the variation of atmospheric temperature. A certain correlation between atmospheric pressure and deformation might be revealed.

## 서 론

인류의 주 활동무대인 지구표면에서 일어나는 각종 변형과정(deformational process)을 연구하는 것은 지구, 인간환경 개선이라는 관점에서 매우 중요하다. 변형을 일으키는 물체의 크기는 그 규모가 매우 다양하여, 지표면 굴곡(relief)의 경우 수m에서 부터 지구의 핵, 맨틀, 지각 및 지체(plate) 등에서의 수천 km까지 광범위하다. 변형의 주기(따라서 주파수)규모 역시, 지진파에서의 수초로부터 late glacial uplift처럼 수만년전 부터 현재까지 지속되는 것도 있다. 전자는 지진학

후자는 측지학과 밀접히 관련된다.

우리가 살고있는 지구에서 일어나는 변형을 감시하는(monitoring) 주 목적은 지각을 포함한 지구 내부구조와 저주파 동력학을 연구하려는데 있으나 그 응용분야로는 지진, 화산폭발, 산사태 등 자연적 재해의 예측이나 대형구조물 및 건물들의 안정성 상실을 사전에 알아내어 인류와 생명체들이 지구에서 안전하게 그 삶을 영유하도록 하고자 하는데 있다.

변형(deformation)은 이동(translation, movement), 뒤틀림(distortion) 및 회전(rotation) 등으로 구성되므로(Hobbs et al., 1976) 변위,

스트레인(normal and shear strain) 및 회전을 성분별로 면밀히 측정, 관측하면 물체의 변형을 파악할 수 있다. 그러나 이동, 뒤틀림 및 회전이 독립적으로 일어나는 일은 거의 없으므로 이들 중 어느 것을 관측하여도 변형의 유무를 파악할 수 있다. 시간경과에 따른 틸트의 변화는 완벽하지는 않지만 변형의 역사(deformational history) 정보를 내포하고 있다는 점에서 변형의 장기관측에 중요한 측정변수(parameter)가 된다.

최근, 우리나라에서는 지반변형에 따른 인공구조물의 대형 붕괴사고가 빈번했으며, 뿐만 아니라 산사태, 단층의 활동성 여부에 대한 논란 등 자연적 지반(및 지체, 지각) 변형도 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 연구는 본격적인 지각변형 연구를 수행하기 전에 지반 기준면의 2-축 틸트 변화를 시험적으로 연속 관측(monitoring) 하고 그 자료를 처리, 분석 하므로써 상기와 같은 지각변형에 관련되는 문제점을 사전에 파악하고 이에 대비하고자 하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 2-축 틸트의 경제적인 시험 관측을 수행하기 위하여 상온을 유지할 수 있는 특별한 지하 틸트미터설치 시설을 하는 대신 지표천부 지반의 변형을 관측하였는데 이와 같은 변형 모니터링은 산사태, 채굴적에 의한 상부 지반침하, 각종 인공구조물의 안정성 감시 및 공기(工期) 중에 있는 토목, 건축현장의 재해 예방 등 다양한 응용분야가 예견된다.

### 관측장비 및 예비실험

#### 관측장비

금번 장기관측에 사용한 2-축 틸트 장기관

측장비는 틸트미터(tiltmeter), 인터페이스-카드(interface-card) 및 PC등 3개의 부분으로 이루어져 있다. 틸트미터는 지반의 틸팅을 감지하는 센서부이며, 인터페이스-카드는 틸트미터와 PC의 중간에서 틸트미터의 작동과 감지 관측된 자료의 입,출력 및 저장을 소프트웨어에 의하여 제어하는 역할을 한다. 이들 중 틸트미터와 인터페이스-카드는 Russian Academy of Science 산하, Institute of Experimental Geophysics(舊 Institute of Physics of Earth)에서 개발된 것(Gusev, 1992)을 사용하였다.

2-축 틸트를 감지하는 틸트미터는 원주형 추(pendulum)를 수직기준선으로 삼으며 틸트 변화에 의한 정전용량의 변화를 주파수(frequency)를 측정하여 다시 틸트로 환산하는 측정원리를 갖고 있다. Fig.1의 LC발진기는

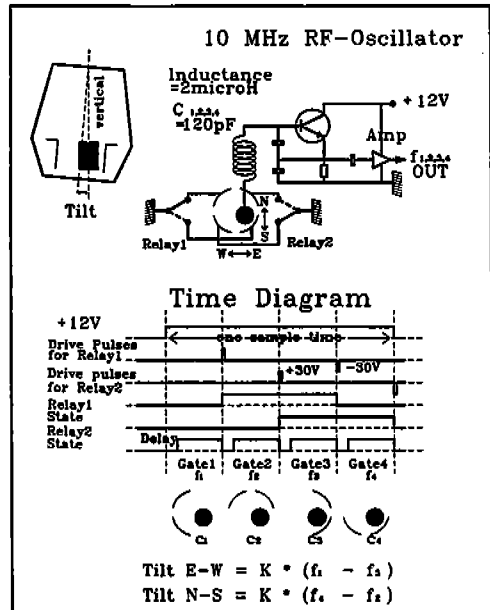


Fig. 1. Principle of 2-coordinate tilt-sensor(tiltmeter)

원하는 기준주파수를 발생할 수 있도록 인덕턴스와 캐패시터를 정하여 회로를 구성한 후, 원주형 캐패시터의 정전용량이 변화하면 발전주파수가 변화된다. 4분 원주형 캐패시터에 연결된 2개 릴레이의 on, off 조합을 통하여 동, 서, 남, 북측 주파수를 순차적으로 측정하고 동-서 및 남-북방향의 주파수 차에 비례상수를 곱함으로써 2-축 방향 각각의 틸트를 측정할 수 있다. 측정 분해능(resolution)은 0.0001 arc.sec이며 측정범위(measurement range)는  $\pm 1$  arc.min이다.

**실험실 예비실험**

관측장비의 성능시험을 위하여 2-축 틸트미터를 한국자원연구소 본관건물 4층에 위치한 403호실 바닥에 설치하고 1992년 12월 8일 9시 20분 부터 동년 12월 10일 11시까지, 만 2일 간 관측실험을 실시하였다. 틸트미터 설치위치는 보통의 연구실로서 사람들이 빈번히 출입하는 장소이므로 잡음(noise)으로 작용하는 순간변형의 영향을 줄이기 위하여 gate time을 10초로 하였으며 sampling interval을 10분으로 하였다.

Fig.2는 2일간의 관측결과를 벡터다이아그램(a)과 시계열(b)로 각각 나타낸 그림인데 그림b의 횡축은 분을 10으로 나눈 값으로서 한 눈금간격이 1시간을 의미한다. 근무시간인 낮동안에는 출입인에 의한 많은 잡음이 혼재되어 있으나 야간에는 잡음이 거의 없다. 남-북방향 성분은 주기성을 뚜렷이 보이는 반면 동-서 성분은 그렇지 않다. 일출 후 주간에는 태양열에 의해 건물 남측부가 팽창하여 북쪽으로 틸팅하고 있으며 일몰 후 야간에는 그 반대의 현상으로서 남쪽으로 틸팅하고 있음을 보인다. 2일 간의 남-북방

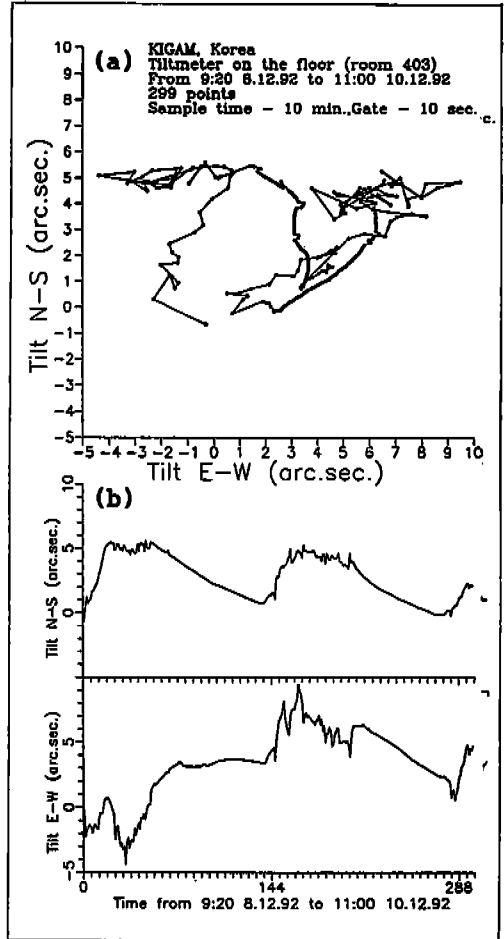


Fig. 2. Two days' tilt monitoring data on the floor of Room #403 of the main building of KIGAM ; a) Vector diagram, b) Time series.

향 틸트의 변화량은 약 7 arc.sec, 동-서방향은 15arc.sec정도이다. 12월 8일 21시 20분과 12월 9일 0시 경에 보이는 동쪽방향의 틸팅은 틸트미터를 설치한 403호실의 동측에 접해있는 404호실에 한 연구원이 약 40분씩 2회에 걸쳐 체류하고 있었음에 기인되었음이 추후 확인되었다.

## 2-축 틸트 연속관측

### 틸트미터의 설치

2-축 틸트의 관측 지점은 연구소 부지 내에서, 상당한 틸팅이 예상되는 동산 사면에 위치시켰으며, 이곳에 틸트미터를 설치할 좌대를 사설하였다. 틸트미터 설치 지점은 차량의 통행이 비교적 많은 연구소 주도로에서 직선거리로 약 20m 떨어진 곳에 위치시킴으로써 차후 도시지역에서의 토목공학적 응용 가능성도 함께 타진하고자 하였다.

시험관측지점의 지형 및 지형지물은 Fig.3-a에 나타낸 바와 같고, 선분 AB의 지형단면은 Fig.3-b와 같이 남서쪽으로 경사한다. C 및 D는 계곡으로서 강우시 자연배수로 역할을 하며 E는 콘크리트로 축조된 인공배수로로서 이곳으로부터 시작되는 F부분은 평탄지형이다.

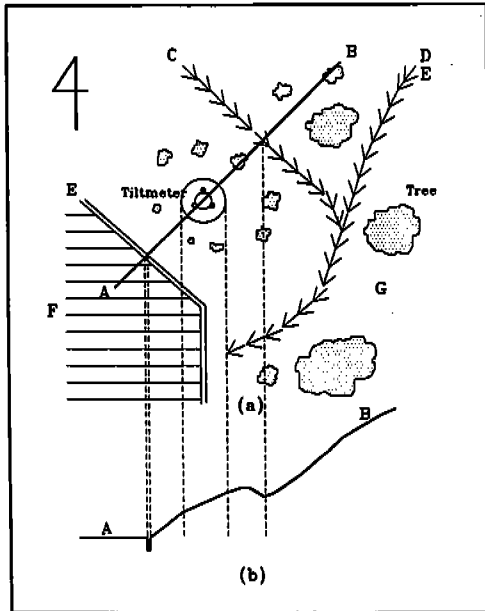


Fig. 3. Configuration of the ground surface around tiltmeter.

G부분은 비교적 큰 나무들이 들어찬 급경사 지형으로 북서 내지 서쪽으로 경사져 있다. 틸트미터 좌대 주변에는 중-소 크기의 나무들이 둘러싸고 있어서 이른 오전 및 늦은 오후에는 틸트미터 좌대에 그늘이 드리우는 상태이다.

틸트미터 설치용 좌대는, 동산 사면의 한 지점에 원주형 구덩이를 지표로부터 약 1m로 파내고 바닥을 다진다음 약 25cm 두께의 콘크리트 기초를 한 후 외경 1m, 높이 1m의 원주형 홉관을 수직으로 안치하였다. 원주형 홉관 내부는 바닥으로부터 50cm까지 콘크리트로 채워 넣은 다음 그 상부에 50cm×50cm×10cm의 석판을, 석판이 5cm쯤 콘크리트에 잠기도록 수평으로 설치하였다. 홉관의 내부와 바닥은 방수처리하였으며 홉관 외부는 다시 원지형에 가깝도록 조형하여 다졌다. 홉관 내부의 상부바닥에 만일을 대비하여 외부로 통하는 PVC 배수관을 설치하였다. 홉관의 상부에는 직경 1.3m, 무게 약 40kg의 원판형 철재뚜껑을 백색으로 도색하여 덮으므로 틸트 모니터링 중에 비바람에 의한 잡음의 영향을 극소화하도록 하였다.

틸트미터 설치용 좌대를 사설한 후 철재뚜껑을 열어놓은 상태로 15일 간 양생하였고 이후 15일 간은 철재뚜껑을 덮은 상태로 방치함으로써 좌대 하부의 지반이 안정화 되도록 하였다.

좌대 석판에 2-축 틸트미터를 방위를 맞추어 안치한 후, 틸트미터와 연구실 내의 PC를 유선연결하였다. 이때, PC 내부 한개의 slot에 인터페이스-카드를 장착하고 틸트미터와 PC를 인터페이스-카드를 경유하여 연결하였는 바, 유선연결의 총연장은 200m이었다. 유선연결 중 하나는 자료의 전송선이며 다른

하나는 틸트미터 내부의 릴레이를 구동하는 전력선(power line)이다.

### 틸트미터의 수평조절

2-축 틸트에 대한 연속관측에 착수하기 전에, 관측 시작시점의 지반기준면(즉, 틸트미터 설치좌대 내 석판 상부면)을 수평으로 즉, 동-서 및 남-북 틸트를 각각 0으로 감지하여 기록하도록 틸트미터를 수평으로 맞추어야 한다. 이를 위하여, 우선 틸트미터에 부착되어 있는 2개의 수준계를 참조하여 3개의 수평조절 knob을 조절한다.

정밀한 수평조절을 수행하기 위하여, 틸트미터가 감지한 동-서 및 남-북 방향의 틸트를 PC의 화면상에 2성분 벡터로 표시할 수 있는 프로그램을 이용하여, 틸트미터의 3개의 수평조절 knob을 조절하는 사람과 PC 화면을 관찰하는 사람 간에 무선통신으로 기준면을 수평으로 감지하도록 반복하여 미세조절한다.

### 연속관측

연구소 부지내의 동산 사면에 설치한 틸트미터를 이용하여 지반의 2-축 틸트 변화에 대한 시험관측을 1993년 5월 18일 13시 00분을 기하여 시작하였다. 이 때, gate time을 1초, sampling interval을 10분으로 하였다. 틸트자료는 관측시각, 동-서 틸트, 남-북 틸트의 순으로 PC의 화면에 숫자로 나타냄과 동시에 하드디스크에 실시간(real time)으로 저장하였다. 동-서 및 남-북 성분의 틸트는 arc.sec의 단위로서 소수 이하 5째 자리까지 계수형으로 저장된다.

연속관측은 관측기간 동안 정전, 전원 불안정 및 원인불명 등으로 여러번 단절되었

으나 관측을 끝낸 1993년 10월 18일까지 대체로 큰 지장 없이 계속되었다. 시험관측 중에 관측 단절의 주 원인이 전원 불안정에 있다고 여겨져서 틸트미터 릴레이(220V AC) 및 PC의 전원부(110AC)에 안정화 전원공급장치(UPS)를 추가로 연결시켰다.

지반의 틸트는 대기의 온도 및 압력, 강우 및 지하수위의 변화(Kumpel et al., 1988) 등에 의하여 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 지반의 틸팅을 정량적으로 해석하기 위하여는 온도, 기압, 강우 및 지하수위에 관한 모니터링도 함께 수행하여야 한다. 그러나 급변 시험관측에서는 이와같은 주변환경적 물리량들을 관측할 수 있는 장비를 갖추지 못하였으므로 관측 기간 중 기상에 관한 일지를 간략히 작성하였으며, 1993년 10월 중에는 온도 모니터링 장치를 별도로 설치하여 2-축틸트와 함께 병행 관측하였다. 1993년 10월 18일에 시험관측을 종료하고 그동안 기록 저장된 2-축 틸트자료를 전산처리 하였다.

관측 전기간 동안의 2-축 틸트 자료를 1시간 간격으로 re-sampling한 후, Fig.4에 나타내었는데 위쪽 그림은 동-서방향 성분의 틸트를, 아래 그림은 남-북방향 성분을 표시한 것이다. 각 그래프의 횡축은 측정시각을 월(month) 단위로 표시하였으며 종축은 틸트를 arc.sec 단위로 나타내었다. 종축의 틸트 중 +는 동쪽 또는 북쪽을 의미하며 -는 서쪽 및 남쪽을 의미한다. 총 관측기간 중 정전, 전원불안정 등의 요인에 의하여 관측이 이루어지지 못한 기간은 총 관측기간의 5% 이하를 차지하고 있다. Fig.4의 7월 5일 09시 20분과 09시 30분 사이에 보이는 양 틸트성분의 급격한 불연속은 관측 중인 틸트가 측정범위를 넘을 것을 염려하여 인위적으로 제차 수평조절을 수행한

때문이었다.

## 자료처리 및 분석

### 자료의 편집

Fig.4의 관측자료 시계열에서 나타나는 off-set 및 인위적인 불연속(artificial shift), 자료의 결여구간들을 메우기 위하여 컴퓨터를 이용한 graphic editing(Gusev, 1993)을 수행한 후, Fig. 5에 시계열로 나타내었다. Fig.5와 Fig.6의 일별 강수량자료(기상청, 1993)를 비교하여 보면 연속관측 기간 중에 나타나는 대소의 변형 event는 대부분 강우와 관련되어 있음을 알 수 있다. 틸트미터 설치위치에서의 틸트의 최대변화는 동-서방향 성분이 약 60 arc.sec, 남-북방향 성분은 85 arc.sec를 보이고 있고 관측기간 중 순(net) 틸트는 서쪽으로 10.06

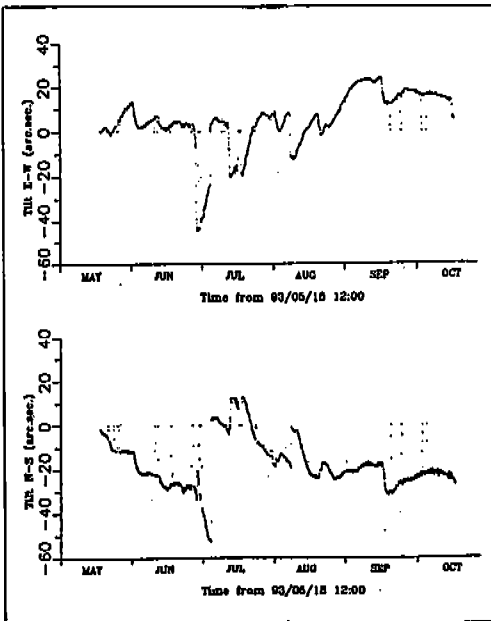


Fig. 4. One-hour re-sampled tilt data of whole period.

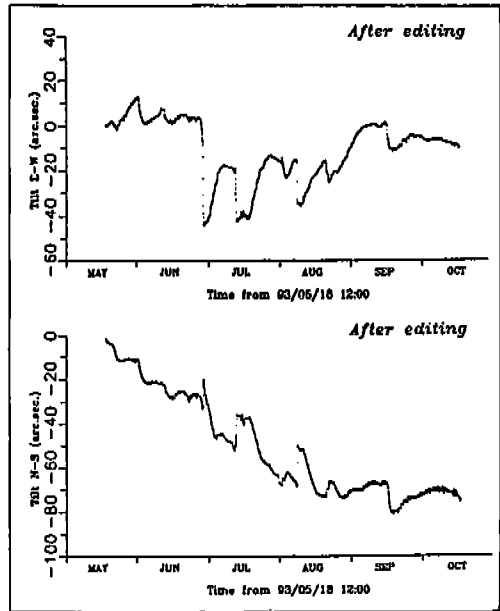


Fig. 5. One-hour re-sampled tilt data after editing

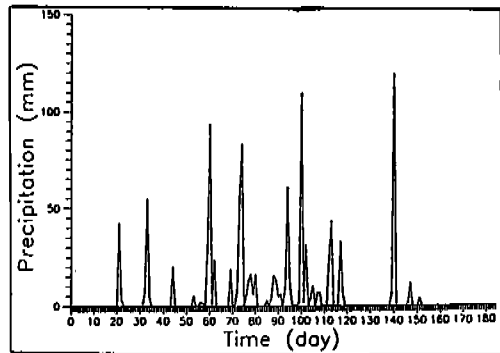


Fig. 6. Daily precipitation during observation period.

arc.sec, 남쪽으로 73.88arc.sec를 보임으로서 S 7.75°W 방향으로 74.56 arc.sec 기울었다. 이는 동기간 중 100m의 수평거리를 갖는 두 지점 간에 3.61cm의 수직변위가 있었던 효과와 같 으며, 시간당 평균 0.02arc.sec의 틸팅을 한 것과 동일한 결과이다.

Power Spectrum 분석

Fig.7은 전체 시험관측기간의 자료를 성분별로 Hanning's 1024 points windows를 이용한 power spectrum 분석결과를 나타 낸 것이다. 동-서성분 틸트의 파워 스펙트럼은 주파수(f)의 3승에 역비례하며 남-북성분 틸트의 파워 스펙트럼은 주파수의 2.85승에 역비례하여 2축-틸트가 주파수와 명백한 함수관계에 있음을 나타내고 있다.

파워 스펙트럼 상에서 보면 24시간 주기( $1.1574 \times 10^{-5}$  Hz)와 이것의 2차( $2.3148 \times 10^{-5}$  Hz) 및 3차( $3.4722 \times 10^{-5}$  Hz) 하모닉(harmonic)의 주기성이 뚜렷한데, 이들은 대기온도와 틸트미터 설치 위치에서의 태양의 복사열에 의한 영향으로 판단되나, 동-서성분에서 보다 남-북성분에서의 주기성이 더욱 뚜렷한 것으로 보아 태양의 복사열에 의한 영향이

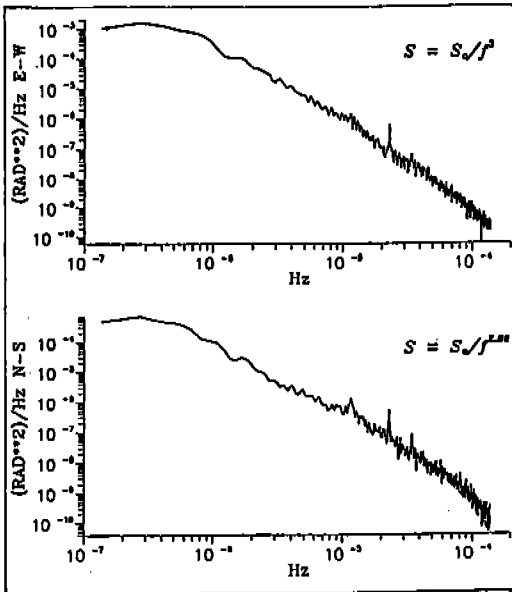


Fig. 7. Power spectrum estimation for the whole observation period(Hanning's 1024 points windows)

강한 것으로 보인다.

필터링

주로 온도(또는 태양 복사열)에 의한 영향으로 판단되는 주기성이 뚜렷한 일변화를 제거하기 위하여 남-북 및 동-서성분의 관측자료에 high-cut 필터링을 수행하였다. Fig.8의 a는 필터링 전의 남-북성분 틸트자료이며 b는 24시간 주기 이하의 고주파성분을 제거한 것이고 c는 36시간 이하, d는 48시간 주기 이하의 고주파 성분을 제거한 결과이며 e는 필터링 전의 동-서성분 틸트자료를 보인 것이고 f는 동-서성분의 틸트자료에서 48시간 주기이하의 고주파 성분을 제거한 것이다. 대체로 48시간 주기 이하의 고주파 성분을 제거하면 틸트 관측자료로 부터 온도(또는 태양 복사열)에 의한 일변화의 영향을 대부분 없앨 수 있음을 볼 수 있다.

의미있는 사건의 추출

시험관측 기간 중에, 관측지점에서 몇몇 의미있는 사건(significant event) 들이 발생하였는 바, 6월 1일부터 4일까지 (a), 6월 28일부터 7월 3일까지 (b), 7월 12일 부터 7월 14일 까지 (c), 8월 7일 부터 8월 9일 까지 (d), 8월 20일 부터 8월 22일까지 (e), 9월 16일부터 9월 18일 까지 (f)의 event들을 2성분 벡터평면에 나타내면 Fig.9와 같다.

그림 b, c, d, e는 동기간 중 각각 152.1mm, 139.7mm, 142.5mm 및 67.5mm 등 비교적 많은 비가 온 기간이었는데 이 기간 중에는 부지 지반이 대체로 북서방향으로 틸팅하고 있음을 볼 수 있다. 비가 어느정도 온 후 부터 매우 빠른 틸팅이 일어나다가 이후 상당히 긴 이완(relaxation)이 지속됨을 볼 수 있다. 물론 비가



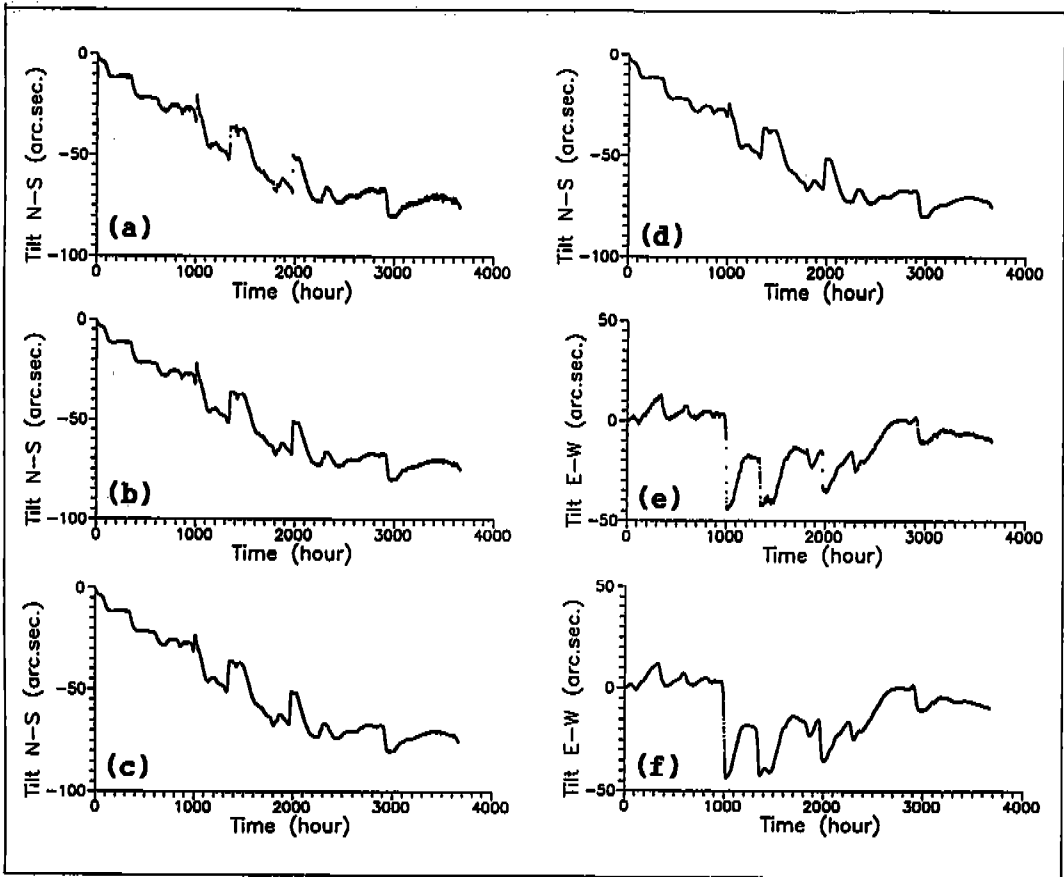


Fig. 8. High-cut filtering effect ; a) Time series of North-South component of tilt before filtering, b) North-South component after 24-hour period high-cut filtering, c) North-South component after 36-hour period high-cut filtering, d) North-South component after 48-hour period high-cut filtering, e) Time series of East-West component of tilt before filtering, f) East-West component after 48-hour period high-cut filtering.

멈추고 난 이후에는 원 상태로 복원되지는 못하지만 대체로 그 반대 방향인 남동방향으로 서서히 틸팅하고 있음을 그림 b에서 볼 수 있다. 이와 같은 변형거동은 틸트미터 설치 위치의 지형(Fig.3)과 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

틸트미터 설치위치 주변에서 빗물은 골짜기를 따라서 틸트미터의 남동방향으로 모이게 되고 그 일부는 지하로 스며들게 될 것이다. 지하로 스며든 빗물은 pore pressure를 증가

시켜 토양층을 상부로 확장(expansion)시킬 것이므로 지반은 북서방향으로 틸팅하게 된다. 따라서, 비가 오고 난 후의 틸트는 지반의 pore pressure gradient에 좌우된다고 할 수 있다.

Fig.9의 a, f는, 틸트미터 위치의 지표 경사 방향으로 일어나는 틸팅이다. a 기간에는 6월 1일에 6.5mm, 6월 2일에 54.4mm, 6월 3일에 4.3mm 등 총 65.2mm의 강수량이 있었음에도 불구하고 b), c), d), e)와는 변형거동이 다

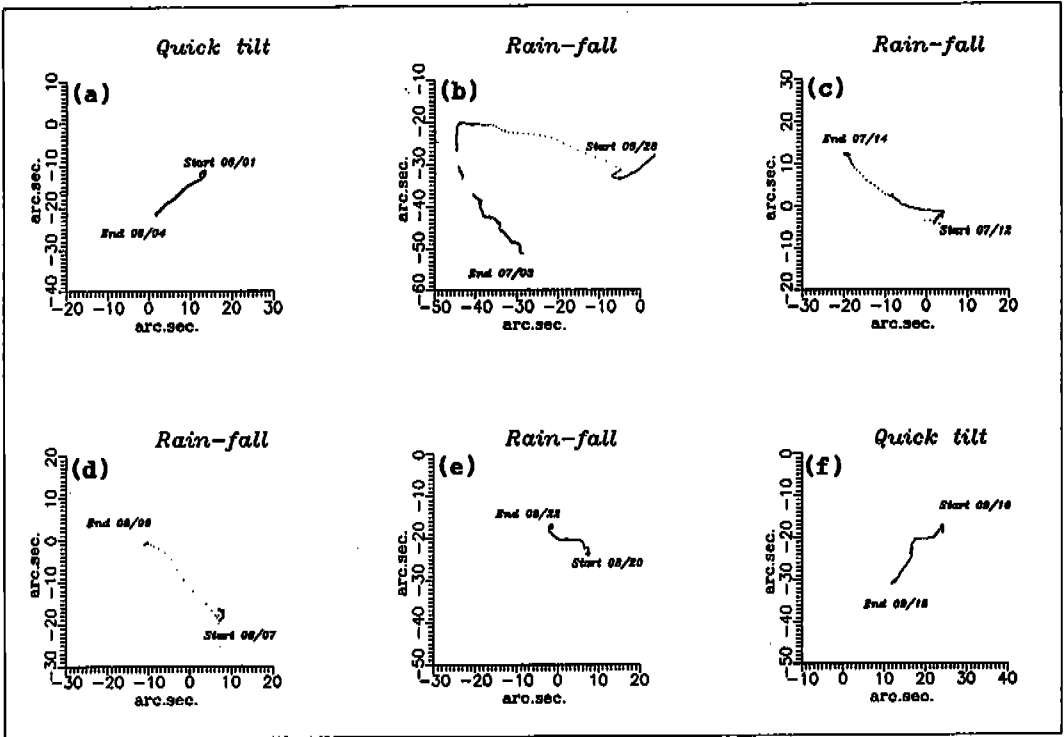


Fig. 9. Significant events during observation period.

르게 나타났는데 이는 틸트미터좌대 설치시 교란되었던 표토층이 지표 경사방향으로 변형(틸팅)되고 있음을 나타내는 것으로 보이며, f 기간에도 역시 9월 16일에 6.2mm, 9월 17일에 119.0mm 등 총 125.2mm의 강수량이 있었던 기간으로서, 그동안 표토층에 축적되었던 응력이 지표 경사방향의 틸팅으로 해소되고 있는 것으로 판단된다.

1일간의 틸트거동

급격한 변형이 없는 날의 틸팅의 일변화(daily variation)를 파악할 목적으로 매일 하루(24시간)(5월 20일, 6월 24일, 7월 22일, 8월 15일, 9월 4일 및 10월 15일)의 관측자료에서 그날의 linear drift를 제거하고 작성한 벡터

다이아그램을 Fig.10에 나타내었다. 짧은 기간(하루) 동안의 틸팅은 그날의 기상조건(영향과 지반자체의 변형이 복합되어 특별한 규칙성이 없이 매우 다양한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

기상조건이 다른 주간 틸트거동 비교

Fig. 11은 시험관측기간 중에, 전형적으로 흐린날씨(또는 약간의 비)가 계속된 8월 14일부터 20일 까지의 관측자료와 맑은날씨가 계속된 10월 7일부터 13일 까지의 관측자료를 비교한 그림이다. 짧은 시간구간(일변화) 동안에는 맑은날의 틸팅변화 진폭이 흐린 날보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 명백히 날씨에 의한 영향이지만 대류온도에 주로

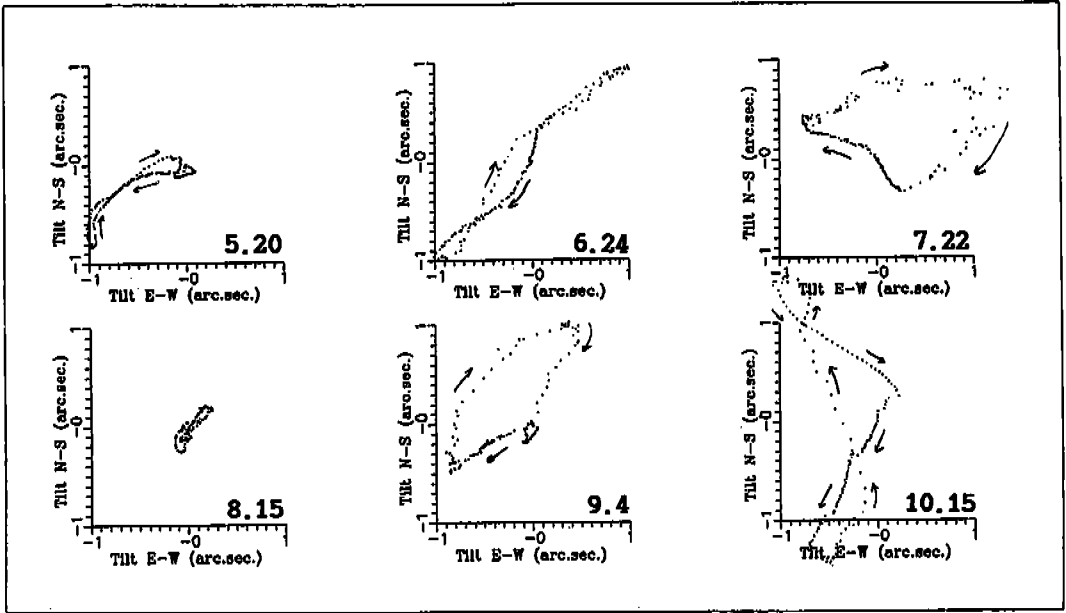


Fig. 10. Vector diagrams of one day from every month after removing linear shift.

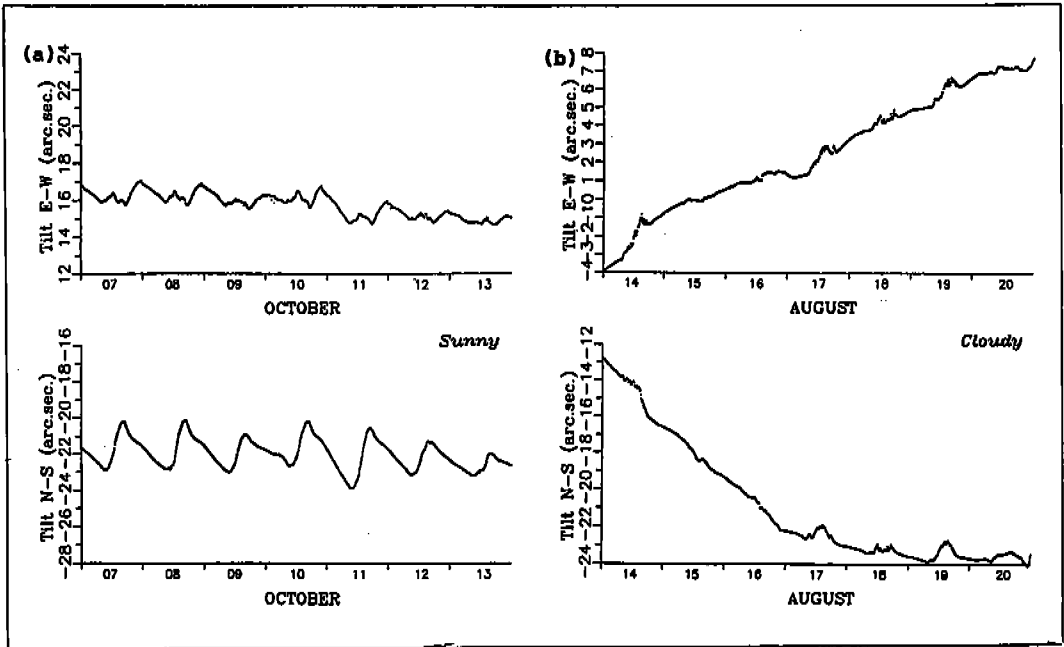


Fig. 11. Comparison between a) sunny, and b) cloudy week tilt data.

지배되는지 아니면 태양의 복사열에 더 크게 영향을 받는지 확인하지 못하였으나(태양 복사열의 영향이 큰 것으로 추측됨), 이의 확인을 위하여 차후 온도 모니터링에 있어 두 개의 온도센서가 필요함을 의미한다. 일주일이라는 동일한 기간 동안, 맑은 주간에서 보다 흐린 주간에 틸트의 총 변화가 큰 것을 볼 수 있는데 이것이 그 이전기간의 강우의 여파인지 아니면 대기압의 직접적인 영향인지 확인할 수 없었으나 역시 변형의 모니터링에 대기압의 모니터링이 병행되어야 함을 의미하고 있다.

### 틸트와 기온의 상관관계

틸트와 기온의 상관관계를 보다 정량적으로 파악할 목적으로 10월 4일부터 10월 18일 까지 태양빛이 직접 쬐이는 곳에 온도센서를 설치하고 외기의 온도변화에 대한 모니터링을 병행하여 Fig.12에 동일기간의 관측틸트 시계열과 함께 나타내었다. a는 온도시계열을 틸트의 남-북방향 성분과 함께 나타낸 것이고 b는 동-서방향의 성분과 함께 보인 것이다. 예상한 바와 같이 일출 후, 기온이 상승함에 따라 지반이 북쪽으로 틸팅함을 볼 수 있으며 일몰 후에는 그 반대 현상으로서 남쪽으로 틸팅하고 있다. 틸팅의 일변화는 기온의 일변화 보다 평균 4.3시간 지연되어 나타나고 있다.

Fig.13은 동일 기간동안 틸트변화와 온도 변화의 Power spectrum을 비교한 것으로서 a는 남-북방향 성분과 온도, b는 동-서방향 성분과 온도를 함께 보인 것이다. 양 성분 모두  $1.15 \times 10^{-5} \text{Hz}$ (24시간),  $2.31 \times 10^{-5} \text{Hz}$ (12시간)(2nd harmonic),  $3.47 \times 10^{-5} \text{Hz}$ (8시간)(3rd harmonic) 주파수 성분들에서 매우 밀접한

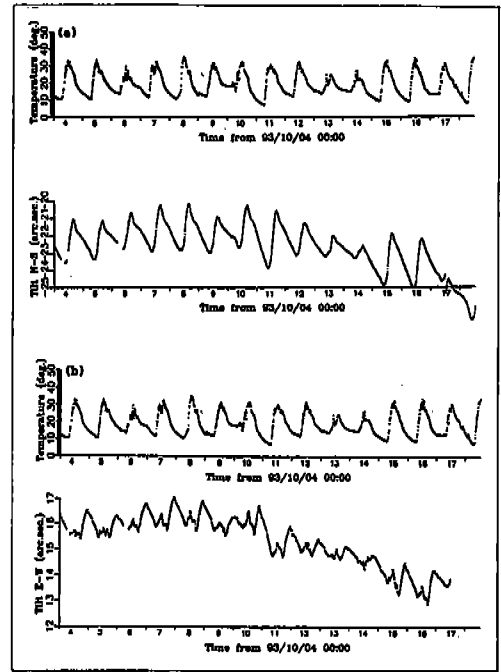


Fig. 12. Correlation of time series between a) temperature and North-South component of tilt, b) temperature and East-West component of tilt.

상호 관련성이 있음을 볼 수 있다.

### 미래 예측

Fig.14는 6개월 간의 관측자료를 토대로 관측지점에서의 향후 틸트변화를 간단한 대수수식으로 외삽하여 예측한 그림으로서 a는 남-북방향 성분을 b는 동-서방향 성분을 보인 것이다. 남-북 방향의 성분은 관측기간 중의 실자료들이 curve fitting(실선)과 비교적 잘 일치하므로 외삽된 예측치도 신뢰성이 있을 것으로 보이나 동-서방향 성분은 관측기간의 앞부분에 해당하는 상당부분의 자료들(1020 hour)을 제거하고 fitting하지 않으면 실제 관측자료와 curve fitting간에 많은 차이를 보이게 되어, 예측의 신뢰성을 떨어

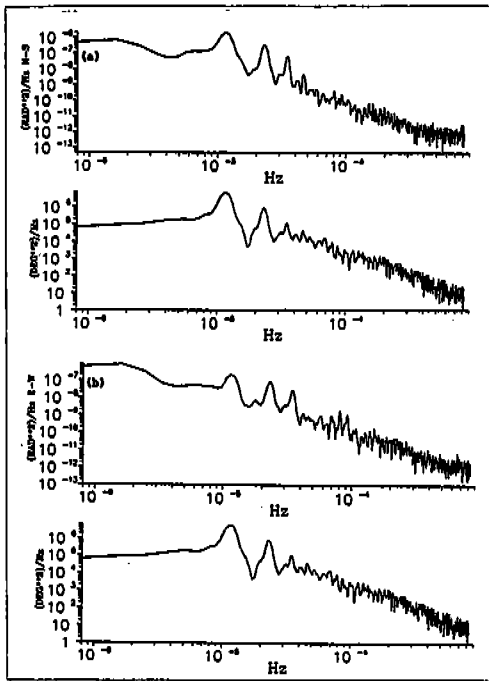


Fig. 13. Correlation of power spectrum between a) temperature and North-South component of tilt, b) temperature and East-West component of tilt.

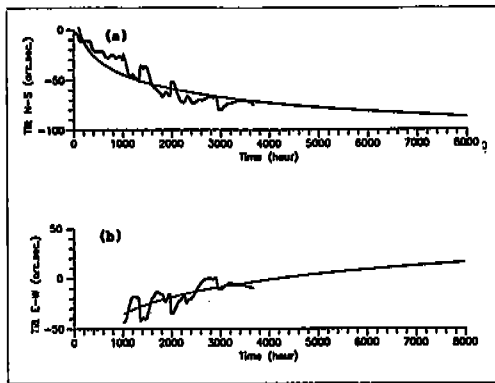


Fig. 14. Simple prediction of another six months ; a) North-South component b) East-West component

뜨리고 있다. 그러나 관측시작 시점으로 부터 1020 시간 이후의 동-서방향 성분 틸트 관측자료가 시간경과에 따라 대수함수 ( $y=25.$

$0649 \times \ln(x) - 208.779$ )로 일정값에 수렴해 가는 추세에 있음을 볼 수 있으며 남-북방향 성분 역시 대수함수 ( $y = -20.5342 \times \ln(x) + 97.1264$ )로서 일정한 값에 수렴해 가고 있음을 볼 때 본 관측위치의 천부 지반은 공학적으로 안전한 상태에 있음을 의미한다고 판단된다.

앞으로 변형자료에 대한 신뢰성 있는 예측방법이 개발되어야 할 것이며 또한 동일 지역에서 후속의 연속관측을 통하여 예측자료에 대한 검증작업도 수행되어야 할 것이다. 저주파 거동에 대한 예측 뿐 아니라 고주파 성분의 단기적 거동에 대한 예측도 토목공학 적 응용에는 매우 중요한 요소가 될 것으로 생각되며 특히 틸팅의 시간변화율의 threshold를 지정하여 자동경보를 발하는 시스템 개발을 위해서는 많은 관측자료의 축적이 있어야 할 것이다.

## 결론

지진, 화산폭발, 산사태 등 자연재해의 예측, 대형구조물 및 건물등의 안전성감시, 토목공사의 공기(工期) 중 지반붕괴의 감시 등 그 응용분야가 매우 다양한 저주파 지각(지반) 변형 감시에 대한 본격적인 연구를 착수하기 이전에 천부 지반 기준면의 2-축 틸트를 시험적으로 연속관측하고 그 자료를 처리, 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 6개월 간의 2-축 틸트 관측기간 중, 틸트의 최대변화는 동-서방향 성분이 약 60arc.sec, 남-북방향 성분이 85arc.sec 이었으며, 동 기간 중 순(net) 틸트는 서쪽으로 10.06arc.sec, 남쪽으로 73.88arc.sec를 보임으로서 S7.75°W 방향으로 74.56arc.sec 기울었다.

- 2) 상기의 틸트는 동 기간 중 100m의 수평거리를 갖는 두 지점간에 3.61cm의 수직변위가 있었던 효과와 같으며, 시간당 평균 0.02arc.sec의 틸팅을 한 것과 동일한 결과이다.
- 3) 틸트미터 설치위치의 지반이 상기와 같이 빠르고 큰 틸팅을 하고 있음에도 불구하고 동-서 및 남-북성분의 틸트가 모두 일정 값에 수렴해 가는 추세에 있음으로 본 위치는 공학적으로 안전하다고 할 수 있다.
- 4) 관측 기간 중 대, 소의 변형 event는 대부분 경우와 관련되어 있으며 틸팅의 방향은 남서방향과 북서방향으로 대별된다. 남서방향은 지표경사 방향과 일치하며 북서방향은 지하로 스며든 빗물이 표토층(overburden)의 pore pressure를 증가시켜 이를 상부로 확장시키는 mechanism과 관련되는 것으로 해석하였다.
- 5) 대기 온도에 의한 2-축 틸트의 일변화는 온도변화에 약 4.3시간 지연되어 나타난다.
- 6) 2-축 틸트의 일변화는 기온변화에 주로 영향을 받는 것이 명백하며, 이 일변화가 동-서성분에서 보다 남-북성분에서 큰 것으로 보아 대류온도 보다 태양 복사열에 더 큰 영향을 받는 것으로 추측된다. 그러므로 지각변형 모니터링과 병행할 기온 모니터링에는 대류온도와 복사온도를 동시에 모니터링 할 수 있는 두개의 온도 모니터링 채널이 필요하다.
- 7) 맑은 주관과 흐린 주간의 2-축 틸트 변화를 대비함으로써 대기압 변화와 지

반변형의 상관관계가 있을 수 있음을 제시하였다. 따라서 정밀한 지반(지각) 변형 감시시스템에는 대기압 모니터링이 추가되어야 할 것이다.

지반 (지각) 변형 감시의 응용분야는 토목 공사의 공기(工期) 중에 실시간(real time)으로 지반붕괴의 위험을 경보하는 것에서부터 지구조석이나 지체변형의 연구 등 순수 지구물리학에 까지 그 응용분야가 매우 광범위하다. 또한 복합적인 변형의 역사를 밝히고 이를 정량적으로 해석하기 위해서는 매우 정밀한 감시시스템이 필요하며 기온(대류 및 복사), 대기압, 강수량 및 지하수위는 물론 바람의 영향등 각종 기상자료들을 동시에 모니터링하여 그 영향을 제거할 수 있어야 할 것이다.

## 사 사

본 논문은 한국자원연구소에서 1993년도 과학기술처 기본연구사업으로 수행한 연구 결과의 일부를 발췌한 것으로서, 한.소 과학기술협력센터 지원의 1992년도 CIS 과학자 유치프로그램의 후속 연구사업이었습니다. 지원해 주신 관계관과 G.Gusev 박사께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 연구에 도움을 주신 한국자원연구소 최종호 책임기술원, 신인철 기술원께도 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

기상청, 1993, 5,6,7,8,9 기상월보(Korea Meteorological Administration, Monthly Weather Report)

Agnew, D.C., 1986, Strainmeters and tiltmeters:  
Review of Geophysics, vol.24, no.3, pp.  
579-624.

Gusev, G., 1992, Personal communication.

Gusev, G., 1993, Personal communication.

Hobbs, B. E., Means, W. D., and Williams, P.  
F., 1976, An outline of structural geology:  
John Wiley & Sons, INC., New York.

Kumpel, H.-J., Peters, J. A. and Bower, D. R.,  
1988, Nontidal tilt and water table varia-  
tions in a seismically active region in  
Quebec, Canada : Tectonophysics, vol.  
152, pp.253-265.

---

이상규 :

한국자원연구소 자원탐사연구부

대전시 유성구 가정동 30

305-350

TEL : (042)868-3151

FAX : (042)861-9720