

## 주성분분석법을 이용한 사면 상태 평가

### Evaluation of Slope Condition using Principal Component Analysis

정수정<sup>1)</sup>, Soo-Jung Jung, 김태형<sup>2)</sup>, Tae-Hyung Kim, 강기민<sup>3)</sup>, Ki-Min Kang, 이영준<sup>4)</sup>, Young-Jun Lee

- 1) 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engineering, Korea Maritime University
- 2) 한국해양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime University
- 3) (주)쏘일테크 엔지니어링 전무이사, Managing Director, Soiltech engineering
- 4) 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engineering, Korea Maritime University

**SYNOPSIS** : Estimating condition of geotechnical structures are difficult because of nonlinear time dependency and seasonal effects. Measuring data of structure failure is highly variable in time and space, and a unique approach cannot be defined to model structure movements. Characteristics of movements are obtained by using a statistical method called Principal Component Analysis(PCA). The PCA is a non-parametric method to separate unknown, statistically uncorrelated source processes from observed mixed processes. Instead, since the "best" mathematical relationship is estimated for given data sets of the input and output measured from target systems. As a consequence, this method is advantageous in modeling systems whose geomechanical properties are unknown or difficult to be measured.

**Keywords** : Monitoring system, Management criteria, Principal component analysis, Non-parametric method

## 1. 서 론

최근 IT(Information Technology) 관련 선진국인 국내특성과 시설물 유지관리에 대한 국민인식변화로 인해 다양한 첨단 계측기기 및 모니터링시스템과 관련된 연구가 활성화되고 있다. 그러나 광섬유센서, GPS 등과 같은 지능형 센서개발 및 센서네트워크 통신 등에 대한 연구가 주축을 이룰 뿐, 실질적인 모니터링시스템의 목적인 이상징후 검지를 위한 계측데이터의 분석 및 유지관리기준은 데이터의 절대치를 기준으로 판단하는 전통적 방식을 탈피하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 사면의 계측데이터를 이용한 상태분석을 위해 실제 계측시스템이 설치되어 운용중인 사면을 대상으로 통계적 접근법을 사용하는 비모수적 방법인 주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)을 적용하였다. 비모수적 방법의 경우, 해당시스템에 대한 모델링시 물리적 가정없이, 해당시스템에서 얻어진 입출력 데이터만을 기반으로 데이터 사이 숨겨진 최상의 수학적 관계를 찾는 것에 중점을 두는 것으로 흙의 불확실성 및 복합적인 환경영향을 분리하기 어려운 지반구조물의 해석에 유리하다.

주성분분석은 물리적 모델이 가정되어 있지 않아 시설물 및 센서의 종류와 무관하게 적용가능하며 센서간 상호관계를 동시에 고려하여 변형에 대한 위치정보를 시각적으로 도식화하여 표현할 수 있다. 또한 사면의 거동을 나타내는 주요성분을 추출할 수 있으며 각 성분별 적재값을 이용하여 정량적으로 이상여부를 나타낼 수 있는 이점이 있다. 따라서 최소한의 가정 하에서 개발된 비모수적 방법인 주성분분석을 이용하여 사면의 거동특성을 분석함으로써, 가정이 만족되지 않음으로서 생기는 오류의 가능성을 줄이고자 한다.

## 2. 주성분분석

### 2.1 정의

주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)이란 해석하고자 하는 다차원의 데이터를 내포된 정보의 손실을 가능한 적게 해서 저차원의 데이터로 축약하는 다변량 비모수적(non-parametric) 방법이다. 여러 개 변수들이 내포된 다변량 변수들을 몇 개의 일차결합을 통해 간단한 구조를 갖도록 자료를 축약하면 다변량 자료의 분석 및 이해에 도움이 되는데 주성분분석은 다변량 분석 기법 중 평균과 분산을 이용한 2차 통계적 기법으로 Karhunen-Loeve 변환 또는 Hotelling 변환이라고도 한다(Sun et. al., 2002).

다차원 데이터는 각 차원의 수만큼 존재하는 기준 축으로 특징 데이터를 표현하며 차원 축소란 기준 축을 줄이는 것으로 다변량 데이터의 이와 같은 주성분에 해당하는 주축을 통계적 방법에 의해 구하고 이 주축 방향으로 데이터를 사영하여 차원을 축소한다. 이것을 쉽게 설명하자면 원래의 데이터를 완전히 표현하기 위해 p개의 주성분이 필요하다고 할 때 정보의 손실이 최소가 되도록 결정한 몇 개의 주성분으로 요약하여 원래의 데이터가 포함하는 정보와 거의 같아지도록 구성하면 훨씬 간단한 형태의 축약된 자료를 구성할 수 있다는 것을 의미하며, 축소된 차원 데이터는 고차원의 데이터가 가지는 정보를 유지하면서도 PCA가 가지는 고차원 데이터 처리 문제를 해결한다(신상일, 2006).

### 2.2 방법

주성분은 각 변수에 가중치를 주어 합성하는 것에 의해 구하여진다. 그 때 원래 변수가 가지고 있는 정보를 최대한 이용하여 개체간의 분산이 최대가 되도록 가중치를 붙인다. 원래의 변수가 가지고 있는 복수의 주성분이 존재하는 경우에는 각각의 주성분은 서로 상관(correlation)이 없도록, 즉 서로 다른 주성분간의 공분산이 0이 되도록 결정한다. 이들의 관계는 다음의 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 z_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \cdots + a_{1n}x_n \\
 z_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \cdots + a_{2n}x_n \\
 z_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \cdots + a_{3n}x_n \\
 &\vdots \\
 z_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \cdots + a_{mn}x_n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $z_1 \sim z_m$  은 주성분,  $x_1 \sim x_n$  은 원래의 변수,  $a_{11} \sim a_{mn}$  은 가중치이다. 분석결과에 의해, 각각의 주성분의 고유치가 1 이상 또는 누적기여율이 80%를 넘는 것을 기준으로 하여 주성분을 선택한다(문진한, 2009).

### 3. 현장 적용

#### 3.1 지질 및 현황

본 절토사면은 국도 3호선에 위치하고 있으며, 행정구역상 충청북도 충주시 상모면 온천리에 해당한다. 총연장 100m, 높이 75m의 터널 입출구부의 절토사면으로 사면을 구성하고 있는 암은 변성퇴적사암 및 탄질 셰일류이며, 단층면을 따라 암반이 이동하였으며 상단부에 인장균열이 존재하고 있는 상태이다. 대상 현장은 터널 입출구부로 절토사면의 안전성 확보가 재해예방에 매우 중요한데 반해 사면 전반에 걸쳐 녹생토가 시공되어 있어 법면 관찰이 어려운 상황이다. 도로개통에 따른 절토사면 시공시 수차례 붕괴로 발생한 구간으로 추가 지반거동을 분석하여 항구대책을 수립할 필요가 있어 상시계측시스템을 설치하였다.

#### 3.2 계측기 설치현황

그림 1에 나타난 바와 같이, 대상 사면에 설치한 계측기 수량은 총 5단면에 걸쳐 TTW Sensor(지표 변위경사계) 17개소로, 무선 CDMA Modem을 통해 실시간 자동계측을 수행하였다. 계측주기는 약 1회/5일 주기로 측정되었으나 일정하진 않으며 개별적 혹은 전체적인 데이터 손실이 다소 있으나 주성분 분석은 이에 영향을 받지 않는다.

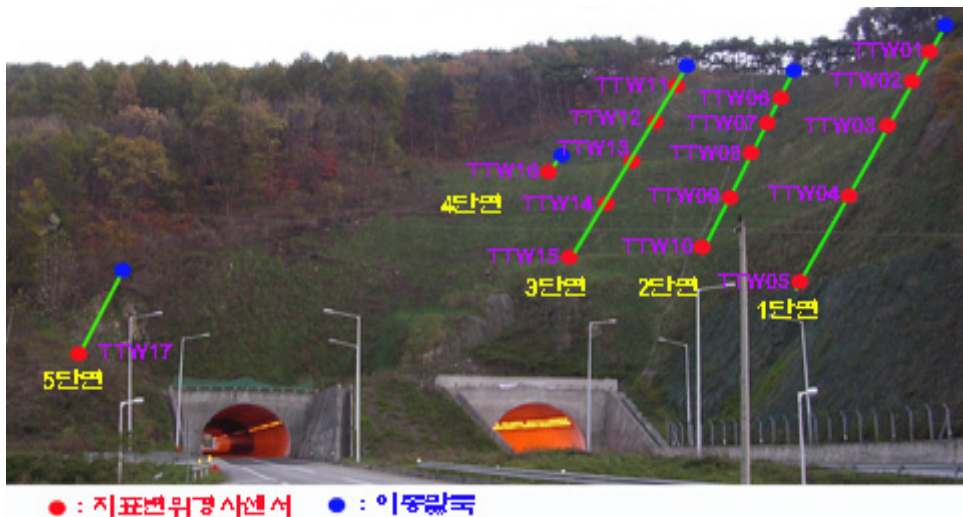


그림 1. 대상사면 센서설치현황

#### 3.3 붕괴 특성 및 규모

본 현장은 절토사면 상부 파쇄대 부분에서 일부 낙석 및 토사유출이 발생하였으며 터널 갱구부 계단식 옹벽 및 배수로에 집적되는 등 소규모로 붕괴가 발생하였다. 이는 절토사면 전체에 걸친 식생토 공법에 의해 부분적으로 발달된 파쇄대 구간을 파악하는데 한계를 가지는데 기인하며, 암반사면으로 설계된 가파른 구배(1:0.7)에서 부분적으로 발달된 파쇄대 주변의 낙석이 진행됨에 따라 뜬돌 형태의 추가 붕락을 초래할 수 있는 상태였다. 이는 갱구부 사면 상단부에 위치하고 있어 추가 붕괴시 통행 중인 차량에 직접적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되어 2005년 9월 방호벽을 설치하고 12월 사면구배 완화 및 낙석방지망을 설치하는 등의 보강 대책을 실시하였다. 변위는 2003년 12월 설치 직후부터 발생하여 2004년 6월부터 시작되는 태풍 디엔무와 민들레 등의 수차례 태풍으로 인해 최대 9mm/월의 증가

를 보였으며, 결국 2005년 7월 장마철에는 1단면과 2단면 사이 중간부분에서 붕괴가 발생하였다. 이 붕괴는 계측데이터를 통해 사전에 감지되어, 현장조치를 취하여 통행 중인 차량과 인명피해를 막을 수 있었다. 그림 2는 붕괴사면 현장사진이다(도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용, 2005).

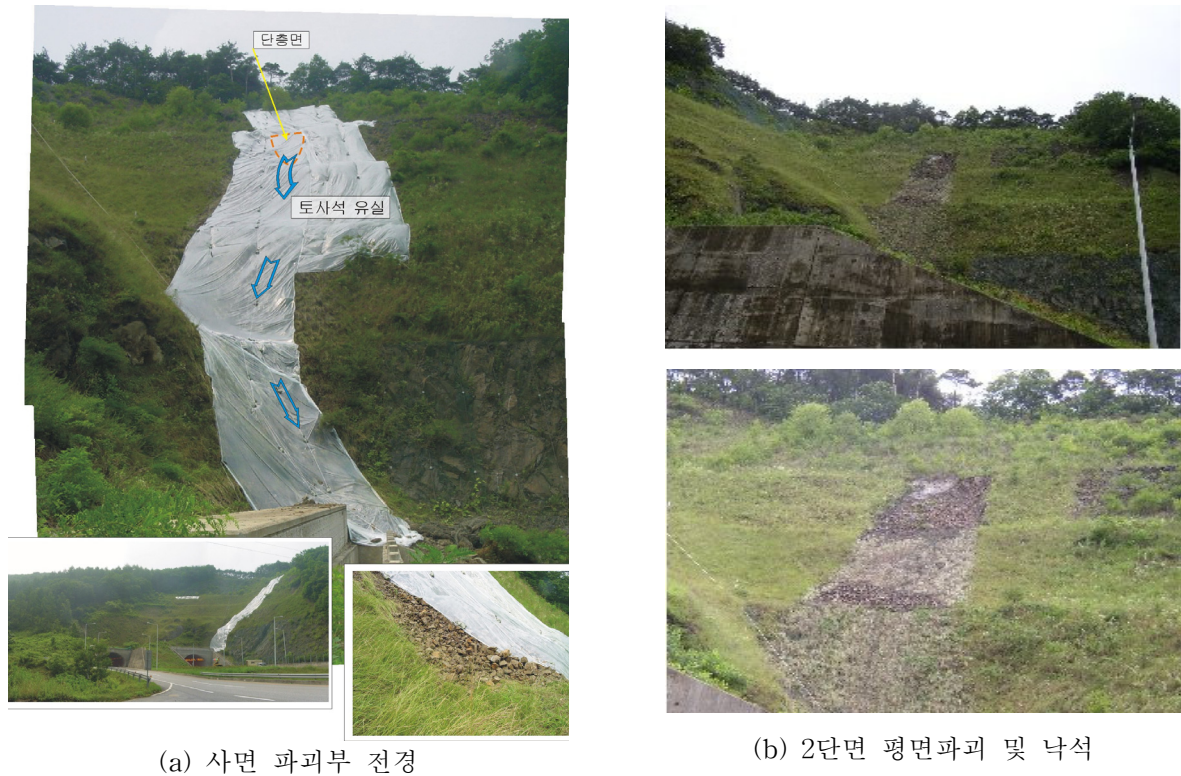


그림 2. 사면 붕괴 전경 및 2단면 붕괴

#### 4. 결과 분석 및 고찰

##### 4.1 센서별 일변량 기술통계

그림 3은 지표변위계를 이용하여 수집된 대표단면 1과 2의 데이터로서 2004년 1월부터 2005년 8월까지 1년 8개월간 계측된 누적변위량 데이터를 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 7번 센서를 제외한 다른 변위량들은 동절기에는 점점 증가하였다가 하절기에는 감소하는 경향을 나타냈으며 이는 계절적 영향인 것으로 판단된다. 대상기간동안 사면의 변화양상은 1단면과 2단면 사이 붕괴가 일어난 바와 달리 표 1에 나타난 바와 같이, 대상기간동안 4단면의 16번 센서의 편차가 가장 작았으며, 2단면의 8번 센서와 3단면의 12번 센서의 편차가 가장 큰 것을 확인할 수 있었다.

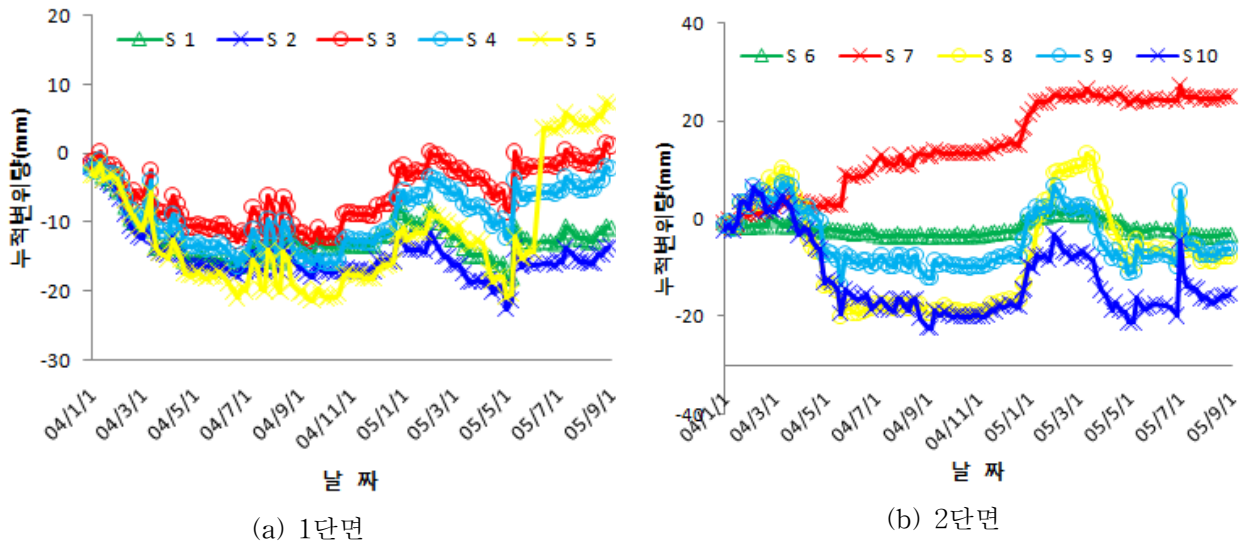


그림 3. 대표단면별 누적변위량

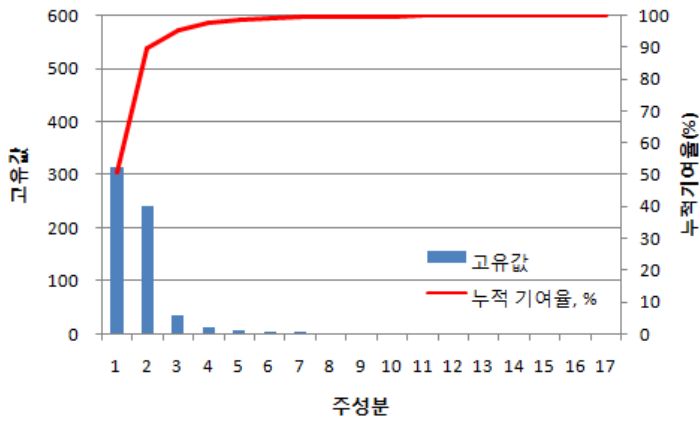
표 1. 센서 개별 통계량

	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	S 11	S 12	S 13	S 14	S 15	S 16	S 17
평균	-12.0	-14.3	-6.9	-10.0	-14.2	-1.7	12.1	-7.1	-3.7	-11.1	3.8	21.2	5.4	1.1	-3.6	-0.8	-6.5
표준편차	3.9	4.5	4.0	4.4	5.4	1.6	8.6	11.4	5.9	8.4	3.1	11.6	4.3	3.1	5.5	0.6	2.4

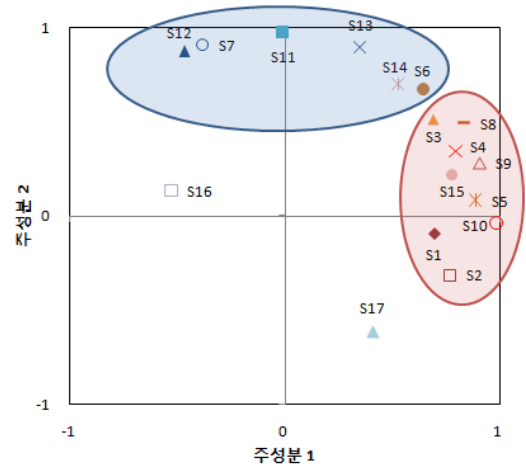
#### 4.2 주성분분석에 의한 사면의 거동 해석

본 연구에서는 주성분분석을 통해 사면의 이상 발생판단의 가능여부를 확인하기 위해 붕괴 이전 정상상태의 2003년 12월경부터 2005년 4월까지 약 1년 4개월 기간동안 총 97회 측정된 데이터를 대상으로 주성분분석을 실시하였다. 대상사면의 17개 계측항목으로부터 주성분분석을 실시하여 총 17개의 주성분과 그에 해당하는 고유치 및 누적기여율을 산정하였다(그림 4(a) 참조). 1, 2 성분들의 각 고유값은 314.1와 242.2로 나타났으며, 각 성분들의 기여도는 각각 50.6%, 39.0%으로 성분 1과 2까지만으로 전체의 약 90%를 설명할 수 있으므로 2개의 성분을 분석대상으로 선택하였다. 그림 4(b)는 주성분 2축까지 고려한 저차원 공간에 17개 센서 변수들을 위치시킨 것으로, 제1주성분축의 우측에 몰려있는 변수들이 센서 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 및 15번으로 주성분 1은 1단면 전체와 2, 3단면의 하부의 거동 특성을 나타내는 변수이며, 제2주성분축의 상반부에 센서 6, 7, 11, 12, 13 및 14번 변수들이 몰려있어 주성분 2는 2단면과 3단면 상부의 거동 특성을 나타내는 변수임을 알 수 있다. 또한, 그림 5는 각 센서의 단면 및 설치 위치를 고려하여 주성분 1과 2를 시각화시킨 것으로 이를 통해 각 센서들이 상호간의 거동양상을 확인할 수 있었다.



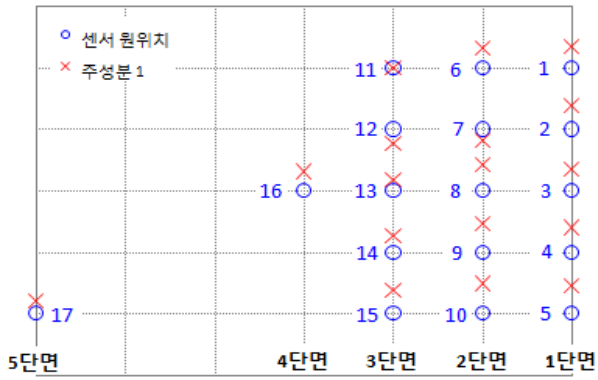


(a) 주성분별 고유값과 누적기여율



(b) 센서변수별 산점도

그림 4. 주성분 분석결과



(a) 주성분 1



(b) 주성분 2

그림 5. 주성분 모드

### 4.3 주성분점수 산정

상기에 언급한 바와 같이, 누적고유치가 약 90%에 달하는 주성분 1과 주성분 2를 이용하여 17개 센서 변수를 대상으로 각 변수에 대한 가중치를 구하고, 주성분 1과 2에서 도출된 고유치의 합 즉, 2개의 각 변수의 고유치비율을 가중치한 가중평균을 통해 주성분점수를 산정하였다. 이는 각 주성분이 설명하는 비율에 따라 가중치를 부여함으로써 자의적이고 편파적인 판단을 하지 않도록 도와준다(이지연, 2009). 주성분 점수는 사면의 상태를 나타내는 척도로서 이상데이터 발생시, 상대적으로 높거나 낮은 값을 나타내게 된다. 그림 6은 주성분점수와 분석기간 동안의 강수량을 나타낸 것으로 붕괴 발생일로부터 약 2달 전인 2005년 5월경에 주성분점수가 상대적으로 큰 변화를 나타내어 한차례 이상 거동이 있었음을 짐작할 수 있다. 이어 상대적으로 가장 큰 변화량을 나타내는 2005년 7월경, 집중강우로 인한 변위 증가로 1단면과 2단면 측에 낙석 및 일부 평면파괴가 발생하였다. 이는 주성분분석을 통해 얻어진 주성분을 이용하여 사면의 이상 거동 및 붕괴를 감지할 수 있음을 나타낸다.

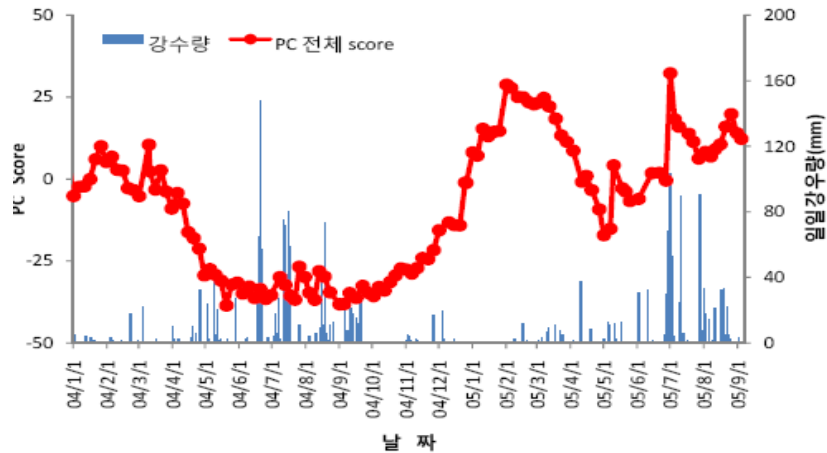


그림 6. 주성분점수 및 강수량

## 5. 결 론

본 연구에서는 사면의 계측데이터를 이용한 상태분석을 위해 실제 계측시스템이 설치되어 운용중인 사면을 대상으로 통계적 접근법을 사용하는 비모수적 방법인 주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 대상사면의 약 1년 8개월간 누적변위량을 관찰한 결과 동절기에는 변위량이 점차 증가하였으며, 하절기에는 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 이는 계절적 영향에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 주성분분석 결과 도출된 주성분 1과 2의 고유값은 314.1와 242.2이며 기여도는 각각 50.6%, 39.0%으로 주성분 1과 2만으로 사면 전체 거동의 약 90%를 설명할 수 있다.
- 3) 주성분 1과 2의 축을 기준으로 한 센서별 산점도를 도식한 결과, 제1주성분축의 우측에 몰려있는 변수들이 센서 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 및 15번으로 주성분 1은 1단면 전체와 2, 3단면의 하부의 거동 특성을 나타내며, 제2주성분축의 상반부에 센서 6, 7, 11, 12, 13 및 14번 변수들이 몰려있어 주성분 2는 2단면과 3단면 상부의 거동 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.
- 4) 1년 4개월간 누적된 계측데이터를 대상으로 주성분분석을 실시하여, 이를 통해 얻어진 주성분을 이용하여 주성분점수를 산정한 결과, 사면의 이상 거동 및 붕괴를 감지할 수 있는 것을 확인하였으며, 추후 이를 통해 정량적인 사면거동예측 및 이상거동 여부의 판단이 가능할 것으로 예상된다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(2005), 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용
2. 문진한(2009), “수치실험 및 주성분 분석에 의한 진해만해역의 적조발생요인에 관한 연구”, 전남대학교 대학원 박사학위논문
3. 신상일(2006), “PCA 기법과 히스토그램 평활화를 이용한 얼굴 인식에 관한 연구”, 광운대학교 정보통신대학원, 석사학위논문
4. 이지연(2009), 주성분 분석을 통해 만들어진 대리변수의 정확도 측정 :부(Wealth) 변수를 중심으로, 통계청 대학원생 논문대회 우수논문집, 제5권, pp.138-176
5. Sun, Z., Bebis, G., Yuan, X. and Louis, S. J.(2002), "Genetic Feature Subset Selection for Gender Classification: A Comparison Study", *Applications of Computer Vision, 2002(WACV 2002). Proceeding Sixth IEEE Workshop*, pp.165-170