

## 주성분분석을 이용한 사면의 위험성 평가

### Risk Evaluation of Slope Using Principal Component Analysis (PCA)

정 수 정<sup>1</sup> Jung, Soo-Jung  
김 용 수<sup>2</sup> Kim, Yong-Soo  
김 태 형<sup>3</sup> Kim, Tae-Hyung

#### Abstract

To detect abnormal events in slopes, Principal Component Analysis (PCA) is applied to the slope that was collapsed during monitoring. Principal component analysis is a kind of statistical methods and is called non-parametric modeling. In this analysis, principal component score indicates an abnormal behavior of slope. In an abnormal event, principal component score is relatively higher or lower compared to a normal situation so that there is a big score change in the case of abnormal. The results confirm that the abnormal events and collapses of slope were detected by using principal component analysis. It could be possible to predict quantitatively the slope behavior and abnormal events using principal component analysis.

#### 요 지

본 연구에서는 사면의 이상 거동 및 붕괴 감지를 위해 실제 계측시스템 설치 후 이상보고가 있었던 사면을 대상으로 비모수적 통계방법인 주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)을 적용하였다. 분석결과, 사면의 이상거동여부를 나타내는 척도인 주성분점수는 이상징후 발생시 정상상태에 비해 상대적으로 크거나 낮은 값을 나타내어 변화량에 큰 차이를 보였다. 이를 통해 주성분 분석을 이용하여 사면의 이상 거동 및 붕괴를 감지할 수 있는 것을 확인하였다. 주성분분석을 활용하여 정량적인 사면거동 및 이상징후의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Abnormal events, Monitoring system, Non-parametric method, Principal component analysis, Slope management

#### 1. 서 론

일반적으로 사면과 같은 지반구조물의 경우, 흙의 비선형적인 거동특성, 실험실에서의 현장상황 재현에 따른 제약, 각종 조사 및 실험방법상의 기술적 한계성 등으로 인하여 붕괴를 사전에 감지하여 대처하기는 어렵다. 따라서 완공 후 사용기간 중에 각종 영향으로 인

하여 발생하는 사면의 거동을 측정하여 설계시의 불확실성 확인 및 안정성 평가 등의 기본자료를 취득하고 손상 및 이상징후에 대한 정보를 조기에 제공함으로써 그에 따른 대책을 세우기 위해 계측을 이용한 모니터링 시스템을 설치한다(한국시설안전공단, 2004). 우리나라에서는 모니터링시스템의 초기 구축비용에 대한 부담 때문에 전반적인 위험도가 높은 사면이나 또는 위험요

1 정희원, 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D., Candidate, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Korea Maritime Univ.)

2 정희원, 한국시설안전공단 네트워크연구단 과장 (Member, Team Chief, Research Group, Korea Infrastructure Safety&Technology Corporation)

3 정희원, 한국해양대학교 토목공학과 부교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

인 제거를 위한 보호·보강공법의 적용에 제한이 있는 사면의 경우에 우선적으로 설치되었으나 최근 IT(Information Technology) 관련 선진국인 국내특성과 국민인식변화로 인해 다양한 첨단 계측기기 및 모니터링시스템과 관련된 연구가 활성화되고 있다.

그러나 광섬유센서, GPS 등과 같은 지능형센서 개발 및 센서네트워크·통신 등에 대한 연구가 주축을 이룰 뿐, 실질적인 모니터링시스템의 목적인 이상징후 감지를 위한 계측데이터의 분석 및 유지관리기준은 데이터의 절대치를 기준으로 판단하는 전통적 방식을 탈피하지 못하고 있는 실정이다. 사면의 붕괴 예측을 정량화하는 기술 부족으로 인해 이와 같은 일괄적인 기준으로 사면의 상태평가를 실시할 경우 시설물 관리에 있어서 관리주체가 알아야 할 다양한 이상징후(abnormal events)를 적시에 감지할 수 없다. 뿐만 아니라 고가의 모니터링시스템을 구축했음에도 불구하고 사면의 이상여부 판단은 기술자의 주관적인 결정에 의존해야 한다. 따라서 효율적인 사면의 유지관리를 수행하기 위해 객관적이고 일반화된 기준에 의한 붕괴위험지역의 체계적 관리와 정량적이고 과학적인 사면 상태판단 및 분석기법의 개발이 시급하다.

본 연구에서는 사면의 이상 거동 및 붕괴 감지를 위해 실제 계측시스템 설치 후 이상보고 이력이 있는 사면을 대상으로 비모수적 통계방법인 주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)을 적용하였다. 비모수적 방법의 경우, 해당시스템에 대한 모델링시 물리적 가정 없이, 입출력 데이터만을 기반으로 데이터 사이 숨겨진 최상의 수학적 관계를 찾는 것에 중점을 둔다. 따라서 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 변수의 단위가 서로 다르다 할지라도 각 변수마다 데이터를 표준화한 후 적용 가능하므로 서로 다른 종류의 센서 측정데이터 분석도 가능하다. 주성분 분석은 대상 구조물의 거동을 나타내는 주요 성분을 추출할 수 있으며 각 성분별 적재값을 이용하여 정량적으로 이상여부를 나타낼 수 있는 이점이 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 사면뿐만 아니라 터널, 교량, 대형건축물 등 다양한 사회기반시설물의 시공 중 및 유지관리시 이상징후 감지기법으로 활

용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 주성분분석(Principal Component Analysis)

### 2.1 정의

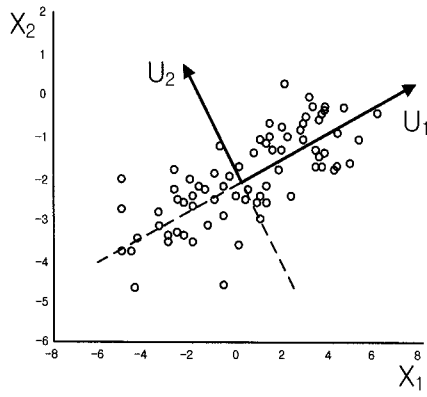
주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)이란 서로 상관성이 있는 다변량 데이터를 내포된 정보의 손실을 가능한 적게 해서 저차원의 데이터로 축약하는 다변량 비모수적(non-parametric) 방법이다(Sun et. al., 2002). 즉, 복잡한 데이터 세트를 단순화하기 위한 다변량 통계 기법이다(Raychaudhuri, 2000; Basilevsky, 1994; Everitt & Dunn, 1992; Pearson 1901).

다차원 데이터는 각 차원의 수만큼 존재하는 기준 축으로 특징 데이터를 표현한다. 차원 축소란 기준 축을 줄이는 것으로 다변량 데이터의 주성분에 해당하는 주축을 통계적 방법에 의해 구하고 이 주축 방향으로 데이터를 사영하여 차원을 축소한다. 이것을 쉽게 설명하자면 원래의 데이터를 완전히 표현하기 위해 n개의 성분이 필요하다고 할 때 정보의 손실이 최소가 되도록 결정한 몇 개의 주요 성분으로 요약하여 원래의 데이터가 포함하는 정보와 거의 같아지도록 구성하면 훨씬 간단한 형태의 축약된 자료를 구성할 수 있다는 것을 의미한다. 축소된 차원의 데이터는 고차원의 데이터가 가지는 정보를 유지하면서도 고차원 데이터 처리 문제를 해결한다.

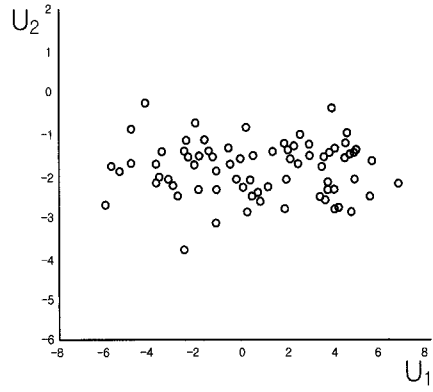
그림 1은 주성분 분석의 개념을 표현하고 있는 그림으로  $U_1$ 은 변동량이 가장 큰 축이며  $U_2$ 는 2번째로 변동량이 큰 축이다. 이 축들은 기저 벡터가 되는 축으로 반드시 서로 수직(직교)을 이루어야 하며 그림 1(b)처럼 주성분으로 이루어진 새로운 축으로 특징 벡터를 회전하여 변환할 수 있다. 특징벡터에서 가장 유용한 성분은 가장 큰 분산 값을 가지는 성분이므로 그림 1(a)에서  $U_1$ 은 제1주축으로 특징벡터의 최대 변량을 표현하며, 제2주축  $U_2$ 는 제1주축이 표현하지 못한 변량을 표현한다(신상일, 2006).

### 2.2 방법

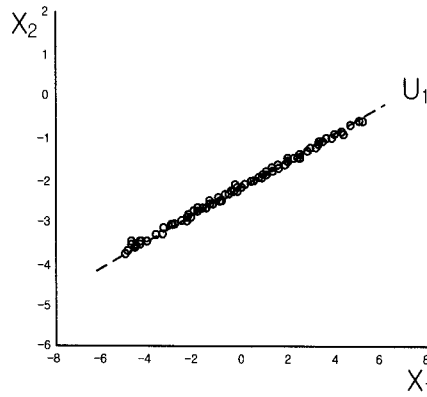
주성분은 각 변수에 가중치를 주어 합성하는 것에 의해 구하여진다. 그 때 원래 변수가 가지고 있는 정보를 최대한 이용하여 개체간의 분산이 최대가 되도록 가중치를 불



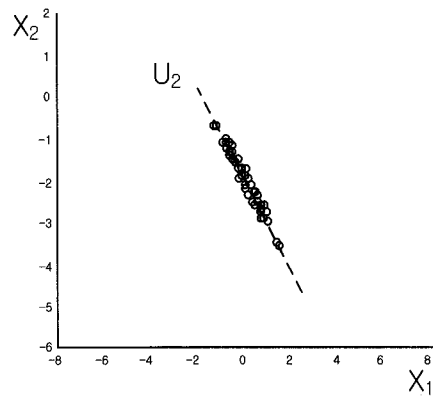
(a) 데이터 분포와 주성분



(b) 주성분 U1과 U2으로 주축 변환



(c) 주축 U1으로 데이터 축소



(d) 주축 U2으로 데이터 축소

그림 1. 주성분분석의 개념을 표현한 예

이다. 원래의 변수가 가지고 있는 다수의 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.

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

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, 각 주성분의 고유치가 1 이상 또는 누적기여율이 80%를 넘는 것을 기준으로 하여 주성분을 선택한다(문진한, 2009). 주성분  $z_1 \sim z_m$ 의 식이 구해지면 그 식에  $x_1 \sim x_n$ 의 구체적인 수치를 대입함으로써 각 관측대상마다 주성분값을 구

할 수 있으며 이 수치를 주성분 점수라고 부른다(노형진, 2008). 이 때, 산정된 주성분 점수가 상대적으로 높거나 낮은 값을 나타내면 즉 이전 값과 비교하여 큰 변화량이 보이면 이상데이터를 나타낸다.

국내에서는 이와 같은 주성분 분석법을 이용하여 이도현(2007)이 지뢰 이미지의 주성분을 추출하여 인식왜곡요인을 제거하고 인식률을 높일 수 있는 지뢰인식시스템을 제안한 바 있다. 또한 택지개발지역의 환경 특성 및 주요 변동요인을 해석하여 효율적인 환경영향조사의 기초자료 분석(조일형 등, 2005), 일본 T하천의 수질특성에 대한 하천관리인자 도출(이재영 등, 2005), 하계 강수량 순변화의 유형과 특징 분석(박현욱 & 류찬수, 2005)에 적용된 바 있다. 국외의 경우, Muniz & Nadal(2009)이 하지골절 환자들과 제어집단들 사이 수직 GRF 패턴을 판별하기 위해 적용한 바 있다. 또한 수분을 함유한 현탁액의 형태의 카마제핀 무수물의 수화물 형태 변형(Tian et al., 2008), 데이터의 분리와 복원을 통해 센서의 오작동 감지(Harkat et al., 2007)에 이용되기도 하였다.

### 3. 현장적용 및 데이터 분석

#### 3.1 지질 및 계측기 설치현황

본 연구의 대상 사면은 총 연장 180m, 최대높이 35m 규모로, 경상북도 봉화군 재산면 영양에서 현동방향 국도 31호선에 위치한 현장이다. 도로와의 이격거리가 좁고 1:06 구배의 급한 경사를 이루고 있다. 사면의 하단부는 호상편마암으로 구성되는 암반사면이며 상부는 토사사면으로 구성되어 있다. 토사사면 구간은 핵석풍화작용이 진행되어 토사와 비풍화잔류암인 핵석이 혼재되어 분포한다. 2003년 현장조사 당시, 상부자연사면의 경사가 급하기 때문에 절취 등을 통한 불안정한 이완 암블록을 제거하는데 제약이 있었다. 또한, 절리 발달에 의한 평면파괴 및 썩기 파괴가 발생할 수 있는 암블록들이 다수 분포되어 있어 2005년 5월 19일 상시계측시스템이 설치되었다.

본 현장에는 지반 변형의 거동을 살펴 보기 위하여 신축계(Tension Wire sensor, T/W sensor)를 이용하였다. 신축계에 의한 방법은 붕괴 예상구간 각 포인트의 거리변동을 계측하여 지표면의 변위에서 붕괴의 변동상태를 파악하는 것이다. 사면의 예측된 활동범위 밖에 Reference Pole(그림 2의 파란색으로 표기)을 설치한 후 wire를 연결하고 활동범위 내 신축계(그림 2의 빨간색으로 표기)를 연결하여 각 단면을 구성한다. 이때 wire는 일정 긴장력을 갖도록 설치하여 초기치를 0(zero)으로 세팅하여 계측을 실시한다. 본 현장의 경우 총 7단면에 걸쳐 16개소에 신축계가 설치되었다(그림 2, 표 1 참조). 적용된 신축계 센서의 정밀도는  $\pm 0.1\text{mm}$ , 가용온도는  $-80\sim 120^\circ\text{C}$ , 재질은 스테인리스 스틸/특수 플라스틱으로 구성되어 있다(한국건설기술연구원, 2006).

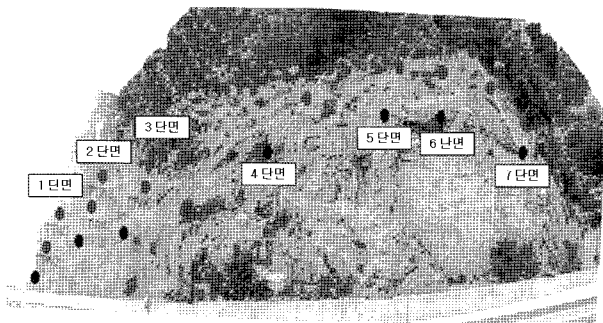


그림 2. 대상현장 계측기 설치도

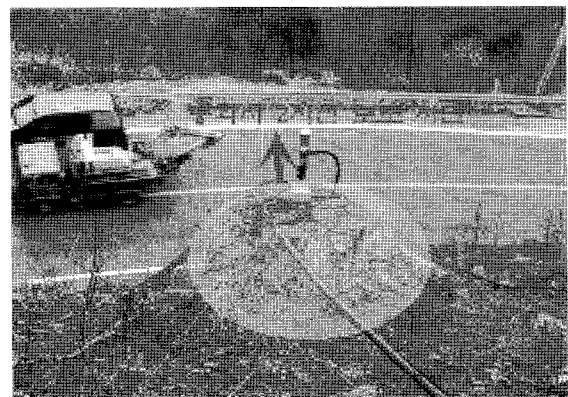
#### 3.2 붕괴 특성 및 규모

본 현장은 2006년 4월 12일 5단면의 12번 센서에서 -27.4mm의 누적변위가 발생하여 1차 이상 발생이 보고되었다. 전일인 4월 11일 누적변위량 -9.7mm에 비교하여 1일동안 -17.7mm의 변위가 추가 발생하였다. 계측기 설치 이후 12번 센서의 최대 일일 변화속도 2.4mm/day에 비해 매우 큰 값을 나타낸다. 현장 육안조사를 수행한 결과, 약 15m 높이의 변위 발생부에 높이 2m, 가로 1.6m 및 세로 1.5m 규모의 붕괴 위험 암반이 관찰되었다.

2006년 4월 20일 2차 이상발생이 보고되었다. 5번 단



(a) 변위발생부



(b) 붕괴시 도로유입 예상부

그림 3. 붕괴 위험 암반

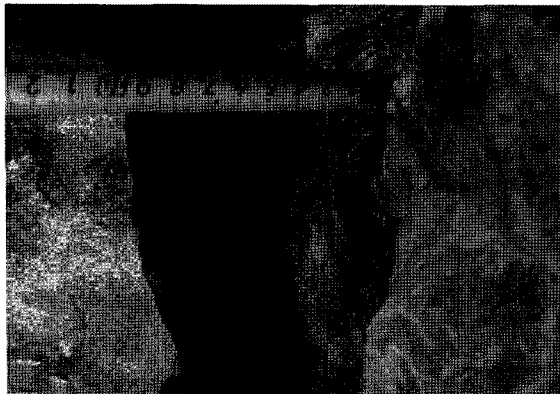
표 1. 단면별 계측기 설치현황

단 면	1	2	3	4	5	6	7
센 서	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	9, 10, 11, 12	13, 14	15, 16

면의 12번 센서는 암반의 활동 거동으로 인해 전 일과 비교하여 하부쪽으로 56.3mm 추가변위가 발생하였다. 또한 5번 단면을 이루는 다른 센서들(9번, 10번, 11번)은 12번 센서와 반대방향인 사면의 상부 방향으로 7.7mm 추가변위가 1일동안 발생하였다. 9, 10, 11번 센서의 경우, 단일체를 이루어 동일한 변위량을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 현장조사 결과, 12번 센서가 설치된 암반부의 활동으로 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이 후 68mm/day의 집중강우가 발생한 2006년 5월 7일 12번 센서는 -62.6mm, 9, 10, 11번 센서의 경우 39.7mm의 급격한 일일 추가변위가 발생되어 3차 이상발생이 보고되었다. 현장조사 결과, 그림 4에 나타낸 바와 같이 폭 80mm, 깊이 500mm의 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 본 현장의 경우 사면 상부는 기 평면파괴가 발생한 부위로 우기시 평면파괴의 우려가 있어 2006년 7월 사면구배를 완화하고 Earth anchor 공사를 완료하였다(그림 5 참조).

### 3.3 분석방법

본 연구의 분석절차는 다음과 같다. 1차 이상보고일(2006년 4월 12일) 이전 대상사면이 정상상태로 유지된 일정기간의 계측 데이터를 이용하여 분석모델을 만들어낸다. 이 때 대상기간은 임의로 결정할 수 있으며 대상기간이 길고 다량의 데이터를 적용할수록 해당사면 고유의 거동양상을 파악하는데 용이하다. 분석모델 대상기간을 결정한 후 해당기간 측정데이터를 대상으로 주성분분석을 실시하여 사면의 거동을 나타내는 각 성분과 그에 해당하는 고유값을 추출한다. 사면의 위험성 평가를 위해서는 주성분점수를 산정해야 한다. 이를 위해 각 성분별 고유값의 기여율을 기준으로 누적기여율이 90% 이상 설명가능한 주성분 수를 결정한다. 결정된 주성분들 식에 전체 분석기간의 실제 측정데이터를 대입하여 주성분점수를 산출한다. 주성분점수는 상대적으로 높거나 낮은 큰 변화량을 나타낼 경우 이상데이터 발생을 의미한다. 따라서, 큰 변화량의 주성분점수를 나타내는 시기와 실제 사면의 이상 보고 시기, 그리고 기



(a) 균열 폭(80mm)



(b) 균열 깊이(500mm)

그림 4. 활동 암괴의 균열

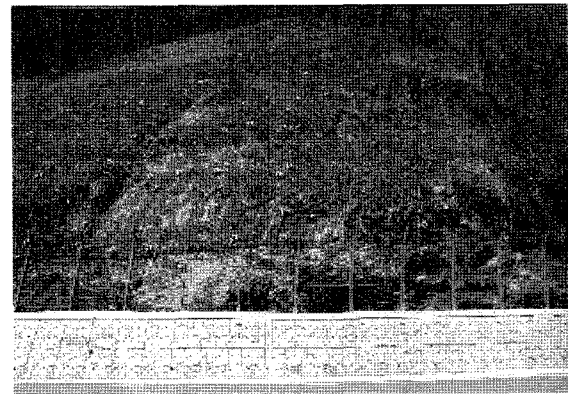
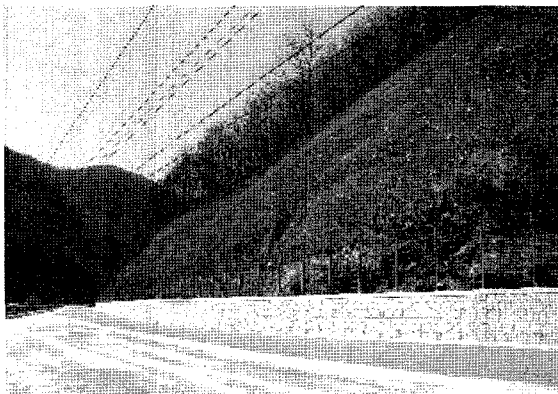


그림 5. 사면 구배완화(절취공) 및 EARTH ANCHOR 공사 완료

존 사면관리 기준방법에 의한 상태판단 결과를 비교, 분석하여 주성분 분석의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

#### 4. 결과 분석 및 고찰

##### 4.1 센서별 일변량 통계량

분석을 실시한 총 계측기간은 2005년 8월 20일부터 2006년 6월 9일까지로 약 10개월이다. 2005년 8월 20일~2006년 2월 16일 동안은 약 1회/5일 빈도로 측정되었으며 2006년 2월 16일~2006년 3월 2일 동안은 1회/2일 빈도로 측정되었다. 또한, 2006년 3월 2일 이후부터는 1회/일 빈도로 측정되었다. 그림 6과 표 2는 총 16개 센서의 개별적 기술통계량을 나타낸 것으로 누적변위량은 최소 -158.36에서 최대 49.03의 분포를 보였다. 데이

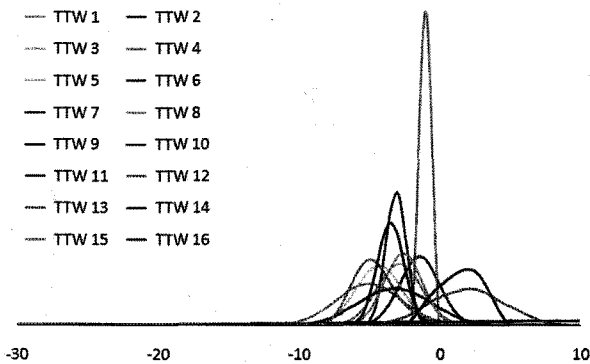


그림 6. 센서별 정규분포

터의 분포는 2번 단면의 4번 센서의 편차범위가 0.15로서 가장 작아 값의 변동이 가장 작았다. 또한 5번 단면의 12번 센서의 편차가 67.78로서 가장 크게 나타났다.

##### 4.2 주성분 분석결과

본 연구에서는 주성분분석을 통해 사면의 이상발생 판단의 가능여부를 확인하기 위한 붕괴 이전 정상상태의 2005년 8월 20일을 시작으로 2006년 3월 16일까지 약 8개월동안 총 108회 측정된 데이터를 대상으로 주성분분석을 실시하였다. 대상사면의 16개소의 계측항목으로부터 총 16개의 성분과 그에 해당하는 고유치 및 누적기여율을 산정하였다(그림 7 참조). 성분 1과 성분 2의 각 고유값은 52.7과 16.7로 나타났다. 각 성분들의

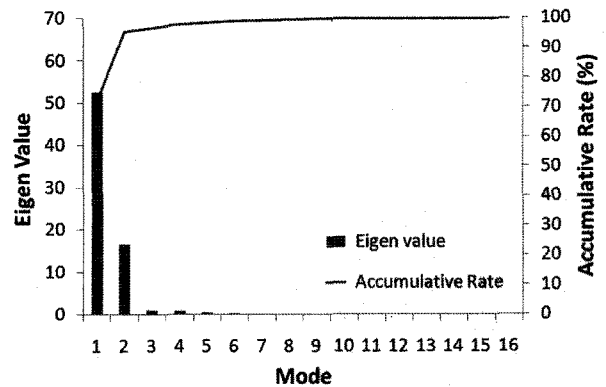


그림 7. 성분별 고유값 및 누적기여율

표 2. 센서별 일변량 기술통계

센서	평균	표준오차편차	최대값	최소값	분석수
1	- 5.02	2.35	- 0.1	-8.94	108
2	- 1.41	1.41	1.79	-3.38	108
3	- 2.82	1.58	0.92	-5.15	108
4	- 1.18	0.15	- 0.9	-1.51	108
5	- 4.30	1.64	- 1.52	-8.64	108
6	- 3.10	0.73	- 0.92	-4	108
7	- 3.13	2.62	3.47	-6.61	108
8	- 2.57	1.36	0.9	-4.22	108
9	15.39	21.40	49.03	-9.01	108
10	14.20	19.78	45.09	-6.89	108
11	16.91	20.11	48.43	-3.92	108
12	-67.74	67.78	0.42	-158.36	108
13	1.98	2.60	8.05	-3.89	108
14	1.43	1.18	3.85	-1.8	108
15	- 4.66	1.44	-1.8	-6.95	108
16	- 3.48	0.95	-1.49	-4.81	108

표 3. 주성분의 입력변수별 적재값

주성분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	.43	.64	.96	.34	.79	.87	.87	.86	.98	.99	.99	-.29	.97	.94	.65	.40
2	.63	.31	.14	.63	.45	.14	.44	.44	-.18	-.00	-.02	.95	.17	.17	.59	.70

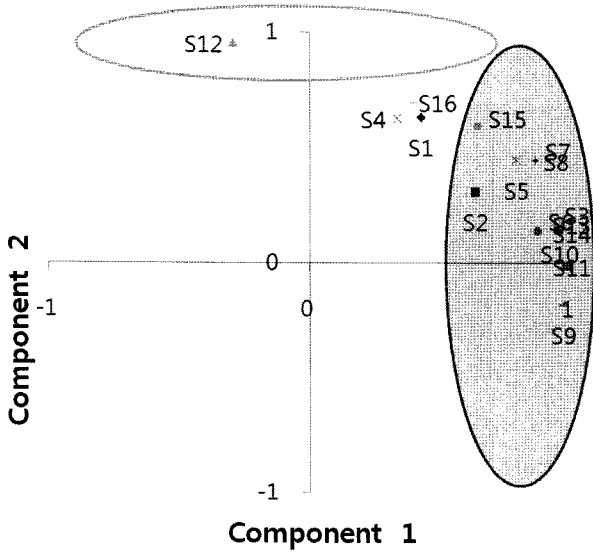


그림 8. 센서변수별 산점도

기여도는 각각 72.5%, 22.9%로 성분 1과 2만으로 전체의 약 95.4%를 설명할 수 있으므로 2개의 성분을 주성분으로 선택하였다. 표 3은 주성분으로 선택된 성분 1과 성분 2의 입력변수인 센서별 적재값을 나타낸 것으로 앞서 설명한 2.2절 식 (1)의  $a_{11} \sim a_{mm}$ 에 해당한다. 그림 8은 주성분 1과 주성분 2를 두 축으로 고려한 저차원 공간에 16개 센서 변수들을 표시한 것으로, 주성분 1축

의 우측에 몰려있는 변수들은 센서 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 및 14번으로 주성분 1은 1번 단면과 7번 단면을 제외한 대부분의 거동특성을 나타내는 변수임을 알 수 있다. 주성분 2축의 상반부에는 센서 12번 변수만이 위치하고 있어 주성분 2는 주로 활동 압괴 위에 설치된 12번 센서의 거동 특성을 나타내는 변수임을 알 수 있다.

### 4.3 주성분 점수 산정

누적기여율이 약 95%에 달하는 주성분 1과 주성분 2를 이용하여 16개 센서변수를 대상으로 각 변수에 대한 적재값을 구하고, 각 주성분별 고유치비율을 가중치한 기중평균을 통해 주성분점수를 산정하였다. 이는 각 주성분이 설명하는 비율에 따라 기중치를 부여함으로써 자의적이고 편파적인 판단을 하지 않도록 도와준다 (이지연, 2009). 상기에 언급한 바와 같이, 주성분 점수는 사면의 이상 징후를 나타내는 척도로서 이상데이터 발생시, 상대적으로 높거나 낮은 값을 나타내게 된다. 그림 9는 전체 기간 동안의 주성분점수와 변화량을 함께 나타낸 것으로 이상 보고가 있었던 3차례(2006년 4월 12일, 4월 20일, 5월 6일)와 동일한 일시에 주성분점수가 상대적으로 큰 변화를 나타내는 것을 확인할 수

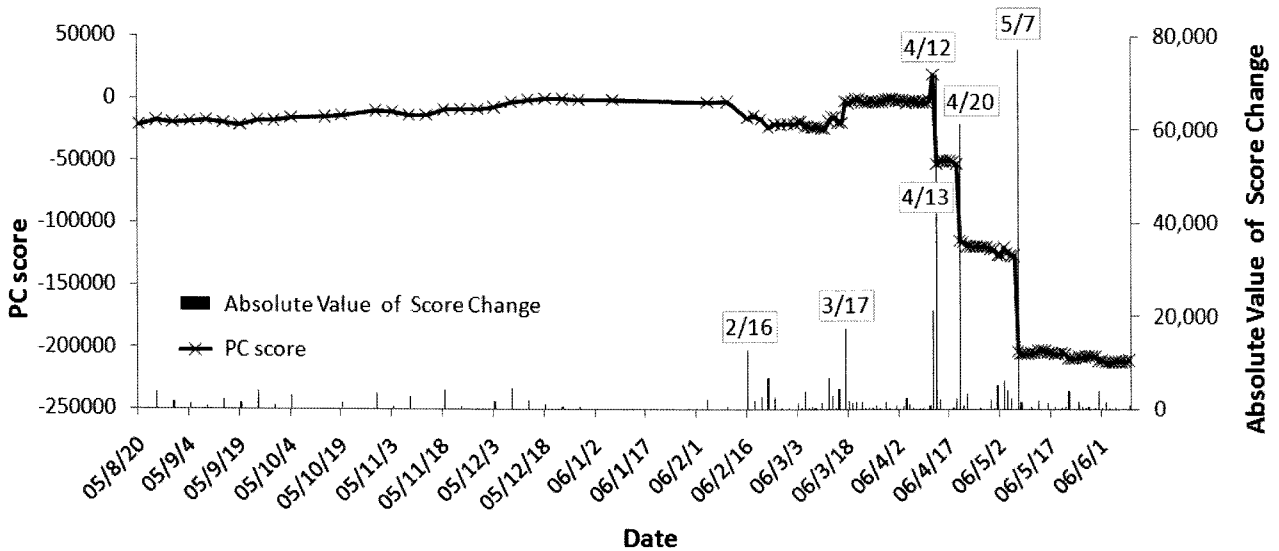


그림 9. 주성분점수 및 변화량

있다. 그림 10은 강우량에 따른 주성분 변화량을 나타낸 것으로 강우량은 봉화 기상관측소의 데이터를 활용하였다. 그림 10에 나타난 바와 같이 3번의 이상발생시 모두 강우의 영향이 컸음을 알 수 있다. 2006년 4월 11일, 12일 이틀간의 강우(10일 : 28.5mm/day, 11일 : 3mm/day)로 인해 12번 센서부의 압반 활동에 의해 균열이 발생된 것으로 판단된다. 또한 4월 19일 37mm/day, 4월 20일 3mm/day 내린 강우의 영향으로 5번 단면의 12번 센서와 다른 센서 간의 균열이 확대되었다. 이후 5월 6일 68mm/day의 집중호우시 붕괴위험 압반의 균열깊이가 최대 깊이 500mm, 폭 80mm까지 확대되었다.

주성분점수 변화량은 0~4,415 범위로 평균 1,660을 보이다, 2006년 2월 16일 12,819로 상대적으로 급격히 높은 값을 나타낸 후 2월 22일 6,740, 3월 15일 4,566, 3월 17일 17,508의 높은 값을 연이어 나타냈다. 이와 같은 변화량으로 보아 4월 12일 1차 이상발생 보고 전 2월 16일부터 이상징후가 발생하였고 이후 압반의 활동이 점차 진행되다 1차 붕괴위험 압괴가 관측된 4월 12일 33,019, 연이어 4월 13일 71,819, 2차 균열 초기 발생일인 4월 20일 61,451, 그리고 최종적으로 균열이 확대된 5월 7일 77,229의 주성분점수 변화량을 나타낸 것으로 추정된다. 이와 같이 주성분점수는 정상상태일 경우와 이상징후 발생시 변화량의 확연한 차이를 나타내며 이를 통해 사면의 이상 거동 및 붕괴를 사전에 감지하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 추후 여러 붕괴사례들의 적용 및 새로운 통계적 품질관리분석을 통해, 사면의 이상징후 판단을 위한 주성분점수의 변화

량에 대한 정상적인 관리기준을 제시할 수 있을 것이다.

#### 4.4 기존 관리기준과의 비교

주성분분석을 통한 사면 이상징후 판단방법의 신뢰성 검증을 위해 기존의 계측시스템 관리기준방법과 비교·분석하였다. 기존의 계측시스템 관리기준은 주로 센서 개별의 일변량 분석에 의한 방법이다. 또한 일괄적인 기준을 제시하여 대상사면의 특성이나 데이터 변화 특성 등이 반영되지 않는다. 현재 도로절토사면 유지관리시스템에서 사용되고 있는 일괄적인 절대치 기준은 누적변위량의 상하한 관리이다. 센서의 누적변위량이  $\pm 50\text{mm}$ 를 초과하면 이상 발생으로 판단하고 그렇지 않으면 정상상태로 판단한다. 본 연구에서는 압반 활동 및 균열이 발생한 5단면의 각 센서 9, 10, 11, 그리고 12번 센서에 대해 이와 같은 관리기준을 적용하여 사면의 상태를 확인하였다(그림 11 참조). 그림 11에서 나타난 바와 같이 9, 10, 11번 센서의 경우 분석기간 동안 모두 관리기준을 벗어나지 않았고, 12번 센서는 4월 13일을 시작으로 관리하한선을 벗어나 계속 이상상태로 판단하였다. 이와 같은 관리기준의 경우, 한번 관리하한선을 벗어나고 나면 계속 이상상태를 나타낼 뿐 이후 발생하는 추가적인 급격한 변위에도 다른 정보나 정보를 나타낼 수 없다. 또한 51mm 발생과 5,000mm 발생을 동일한 이상상태로만 나타낼 뿐 위험성 정도에 따른 정보를 얻을 수 없다.

일본의 경우, 지표변위 속도에 대한 관리기준치를 제

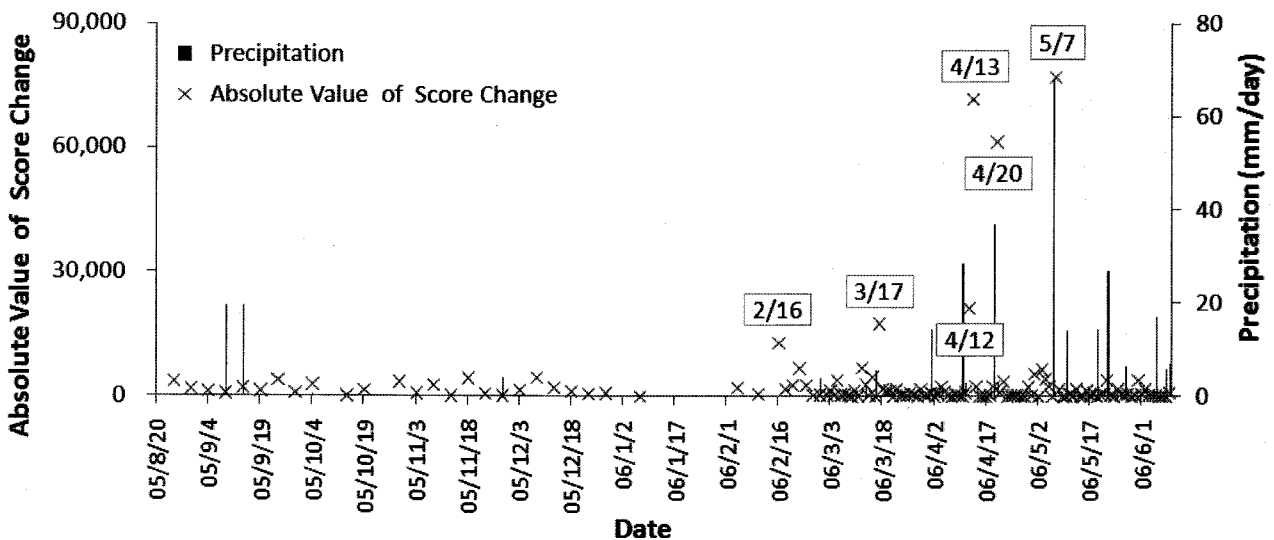


그림 10. 주성분점수의 변화량 및 일일 누적 강우량



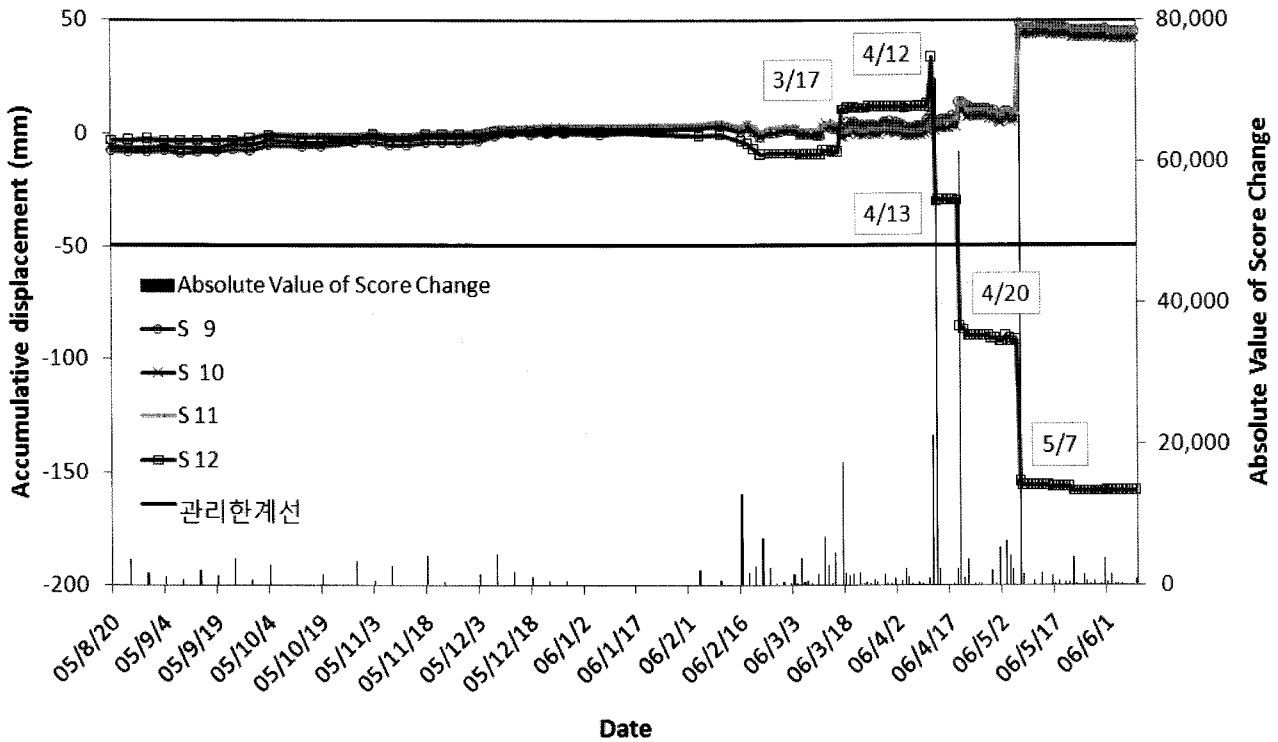


그림 11. CSMS 상시계측시스템 관리기준과의 비교

표 4. 일본 고속도로조사회에 의한 유지관리시 관리기준

계측항목	점검·요주의 또는 관측강화	대책 검토	경계 및 응급 대책	엄중경계 및 일시대피
지표면의 변위속도	10mm이상/30일	5~50mm/5일	10~100mm/일	100mm이상/일

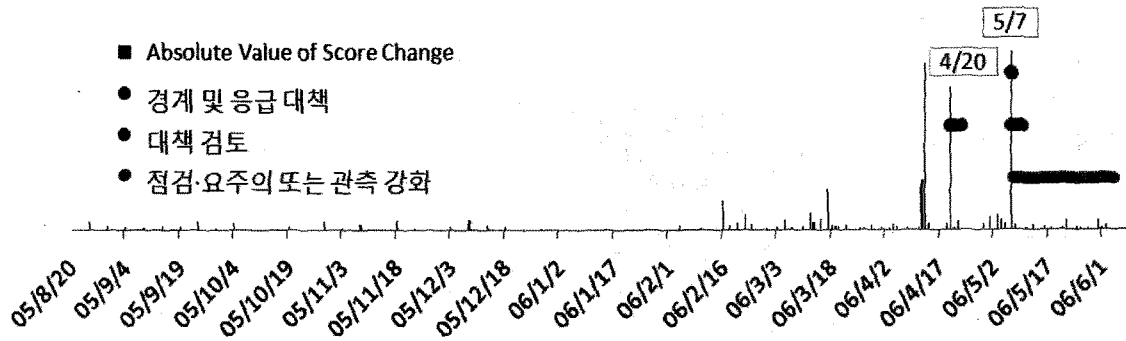
시하고 있으며 이들의 기준은 표 4와 같다(한국시설안전공단, 2004). 표 4는 일본 고속도로조사회에 의한 관리기준으로 1) 점검·요주의 또는 관측강화, 2) 대책 검토, 3) 경계 및 응급대책, 그리고 4) 엄중경계 및 일시대피 총 4단계로 구분하여 제시하고 있다. 이 관리기준 또한 각각의 단일센서에 대해 개별적으로 판단하는 일변량 분석방법으로 5단면의 각 센서 9, 10, 11, 그리고 12번 센서에 대해 관리기준에 대해 분석을 실시하였다(그림 12 참조). 그림 12에 나타낸 바와 같이 각 센서들 모두 분석기간동안 경보 4번째 단계인 ‘엄중경계 및 일시대피’ 경보를 나타내지 않았다. 또한 각 센서 모두 4월 20일과 5월 7일에는 모두 이상 징후를 나타냈다. 12번 센서의 경우 3월 17일에도 경계 및 응급대책 정보단계가 발생하였다. 그러나 표 4와 같은 지표변위 속도에 대한 관리기준에 의해 사면의 이상징후 판단시, 그림 12(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 1단계 관리기준에는 해당하지 않으나, 2단계 기준에는 벗어나는 오류가 발생한다. 뿐만 아니라 5월 7일과 같은 급격한 변위 변화가 발생하게 되면 이후 추가변위가 발생하지 않더라도 판

단기준일이 되는 5일(또는 30일) 동안은 계속 이상상태로 판단하게 된다. 또한 동일한 상태를 유지하더라도 판단기준인 이후인 5월 11일(또는 7월 5일)에는 같은 변위량에서도 정상상태로 판단하는 오류가 발생한다.

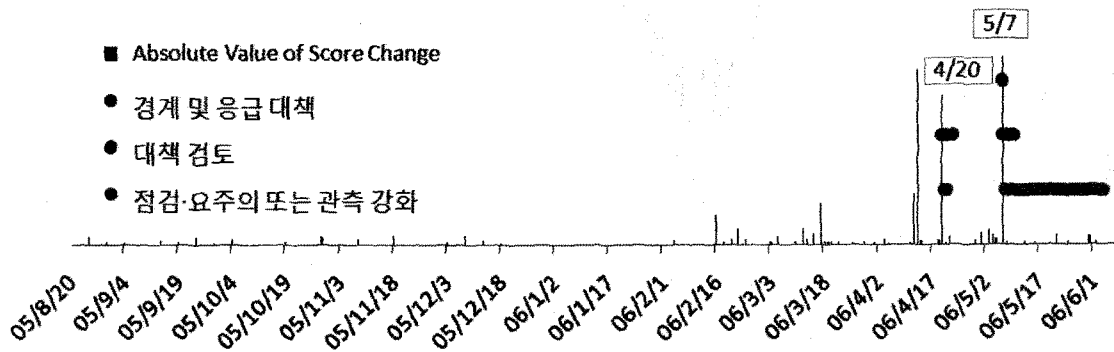
## 5. 결론

본 연구에서는 사면의 이상 거동 및 붕괴 감지를 위해 실제 계측시스템이 설치 후 이상징후 보고가 있었던 사면을 대상으로 비모수적 통계방법인 주성분분석(PCA : Principal Component Analysis)을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

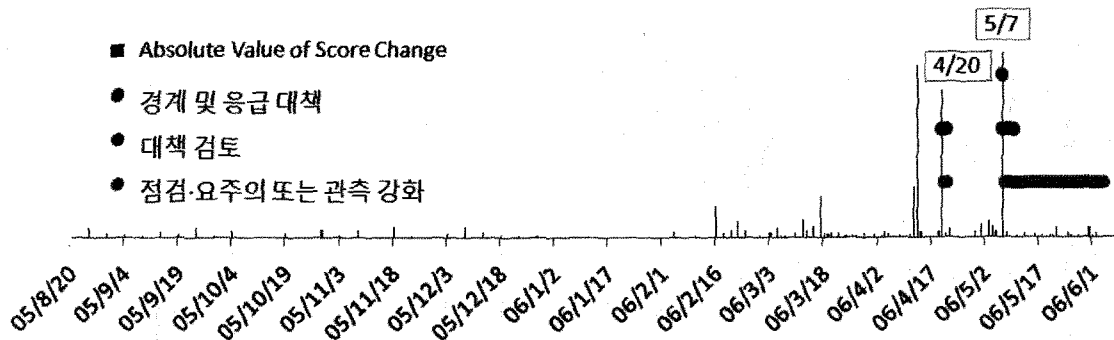
- (1) 붕괴 이전 정상상태의 약 7개월간의 데이터를 대상으로 주성분 분석을 실시한 결과, 주성분 1과 2의 고유값은 52.7와 16.7이며 기여도는 각각 72.5%, 22.9%으로 주성분 1과 2만으로 사면 전체 거동의 약 95%를 설명할 수 있다.
- (2) 주성분 1과 2의 축을 기준으로 한 센서별 산점도를



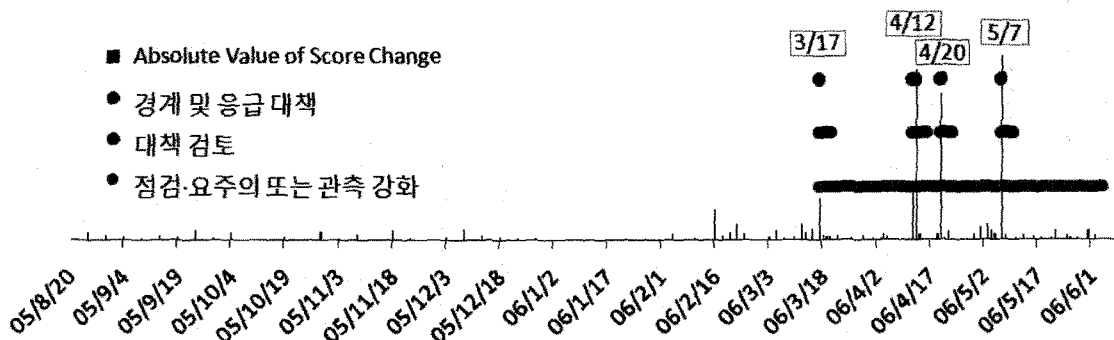
(a) Sensor 9



(b) Sensor 10



(c) Sensor 11



(d) Sensor 12

그림 12. 변위속도에 의한 관리기준과의 비교

도식한 결과, 주성분 1은 1번 단면과 7번 단면을 제외한 대부분의 거동특성을 나타내는 변수이며, 주성분 2는 주로 활동 암괴 위에 설치된 12번 센서의

거동 특성을 나타내는 변수임을 알 수 있다.  
 (3) 주성분점수 변화량은 0~4,415 범위로 평균 1,660을 보이다, 2006년 2월 16일 12,819로 상대적으로 급격

히 높은 값을 나타낸 후, 3번의 이상보고시 33,019, 71,819, 그리고 77,229의 매우 큰 변화량을 나타냈다. 이와 같은 변화량으로 보아 1차 이상보고 이전 2월 16일부터 이상징후가 발생하였고 이후 암반의 활동이 진행되어 암반의 균열이 발생된 것으로 추정된다.

- (4) 기존의 사면 관리기준들과 비교·분석한 결과, 주성분 분석을 이용한 사면의 위험성 판단은 기존의 기준들에서 나타나는 문제점(관리한계선을 벗어나면 이후 급격한 변화 발생시에도 감지 불가, 경보단계 판단의 오류 등)들을 해결할 수 있었다.
- (5) 본 연구를 통해 주성분점수 변화량을 통한 사면의 이상 거동 감지가 가능하다는 것을 확인하였으며, 추후 여러 붕괴사례들의 적용 및 새로운 통계적 품질관리분석을 통해 사면의 이상징후 판단을 위한 주성분점수의 변화량에 대한 정량적인 관리기준을 제시할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술 혁신사업의 일환인 ‘낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발(05 지역특성 B02-01)’의 연구비로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. 문진한 (2009), “수치실험 및 주성분 분석에 의한 진해만해역의 적조발생요인에 관한 연구”, 전남대학교 대학원 박사학위논문.
2. 박현욱, 류찬수 (2005), “주성분분석을 이용한 하계 강수량의 순변화 유형과 특성, 대한지리학회 2005년 춘계학술대회.
3. 신상일 (2006), “PCA 기법과 히스토그램 평활화를 이용한 얼굴

인식에 관한 연구”, 광운대학교 정보통신대학원, 석사학위논문.

4. 이도현 (2007), “주성분분석을 이용한 지뢰인식 시스템”, 조선대학교 대학원 석사학위논문.
5. 이재영, Yuko Sato, 강미아, 정교철 (2005), “주성분분석기법을 적용한 온천 및 폐광산 오염원에 대한 하천수질평가”, *Journal of Engineering Geology*, Vol.15, No.4, Dec., 2005, pp.381-390.
6. 이지연 (2009), 주성분 분석을 통해 만들어진 대리변수의 정확도 측정 : 부(wealth) 변수를 중심으로, 통계청 대학원생 논문대회 우수논문집 제5권.
7. 조일형, 김용섭, 조경덕 (2005), “주성분분석을 이용한 환경영향 평가와 사후환경조사의 비교 및 평가에 관한 사례연구”, *한국환경보건학회지* 제31권 제2호, pp.134-146.
8. 한국시설안전공단 (2004), 절토사면 유지관리 매뉴얼.
9. 한국건설기술연구원 (2006), 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용.
10. Basilevsky, A. (1994) *Statistical Factor Analysis and Related Methods, Theory and Applications*. John Wiley & Sons, New York, NY.
11. Everitt, B. S. and Dunn, G. (1992) *Applied Multivariate Data Analysis*. Oxford University Press, New York, NY.
12. Harkat, M. F., Djelel, S., Doghmane, N. and Benouaret, M. (2007), “Sensor Fault Detection, Isolation and Reconstruction Using Nonlinear Principal Component Analysis”, *International Journal of Automation and Computing*, Vol.4, No.2, April 2007, pp.149-155
13. Muniz, A.M.S. and Nadal, J. (2009), “Application of principal component analysis in vertical ground reaction force to discriminate normal and abnormal gait”, *Gait & Posture* Vol.29, January 2009, pp.31-35.
14. Pearson, K. (1901), “On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space”, *Phil. Mag.* 2, 559-572.
15. Raychaudhuri, S., Stuart J. M. and Altman R. B. (2000), *Principal Component Analysis to Summarize Microarray Experiments: Application to Sporulation Time Series*, *Pacific Symposium on Biocomputing* 5, pp.452-463.
16. 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.
17. Tian, F., Rades, T. and Sandler, N. (2008), “Visualizing Solvent Mediated Phase Transformation Behavior of Carbamazepine Polymorphs by Principal Component Analysis”, *AAPS PharmSciTech*, Vol.9, No.2, June 2008, pp.390-394.

(접수일자 2010. 9. 7. 심사완료일 2010. 10. 7)