

## 지중온도와 변형율과의 상관관계를 통한 활동영역의 추정

장기태

국립금오공과대학교 토목공학과

### Failure Zone Estimation from the correlation between the Temperature in Slope and the Soil Nail Strain

Ki-Tae Chang

Kum-Oh National Institute of Technology, Korea

#### ABSTRACT

It is necessary, in the light of the importance of long-term slope stability problem, to develop a simple method or tool which can figure out the possible failure zone resulted from weathering effect and other factors. The FBG sensor system is used to estimate the correlations between the temperature and the slope in Kimhae, and to find a failure zone in slopes effectively. This research is to seek for the correlation between the soil temperature distribution and the strain distribution in a active zone by analyzing the data from the in-situ measurement so that the possible failure zone should be well defined based on the correlation. For instance, the zone of high temperature fluctuation can be regarded as one of the possible sliding zone due to the weathering effect while the constant temperature depth of the ground, if exists would not be relatively affected by the weathering process.

#### Key words

slope stability, FBG sensor, soil temperature distribution, strain distribution, active zone

#### 1. 연구 배경 및 목적

사면의 붕괴를 유발하는 요인은 지반의 풍화, 지하수의 유입, 대기온도의 변화 등 매우 다양하다. 이 중 온도의 변화는 지하수 및 토립자의 물성을 변화시켜, 사면의 붕괴에 많은 영향을 끼치므로, 사면내의 온도의 변화구간과 항온 구간을 구분할 수 있다면, 사면의 파괴면을 예측할 수 있을 것이다. 이 가상활동 파괴면을 추정하여 사면의 거동과 안정을 예측하고, 나아가 사면안정 설계 및 계측에 반영할 수 있다.

본 연구에서는 사면 현장에 설치된 광섬유를 이용한 계측기의 계측 데이터를 바탕으로 사면의 가상활동 파괴면의 추정과 항온심도의 결정, 그리고 이들의 연관성을 검토하였다. 그리하여, 사면내의 지중온도와 사면보강재의 변형간의 상관관계를 규명하고, 사면의 안정성을 확보하는 방안을 제시하고자 한다.

#### 2. 계측시스템

본 계측에 사용된 것으로, 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating Sensor, FBG Sensor) 시스템은 변형율과 온도 등의 변화를 반사 파장의 변이 측정을 통해 간단히 측정할 수 있고, 통신상에 이용되던 파장분할 다중화(Wavelength-division multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 동시에 다점 측정 기술을 쉽게 구현할 수 있다. 또한, 변형의 절대량 측정이 가능하고, 출력신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광강도의 변화에 무관하여 시스템 구성이 용이하며, 출력 신호가 변형에 대하여 선형적이며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도 특성이 우수하다는 장점이 있다. 그림 1은 광원과 광스펙트럼 분석기(OSA)를 이용하여 광섬유 한 줄에 여러 파장대의 센서를 동시에 감지하는데 필요한 FBG시스템의 개요이다.

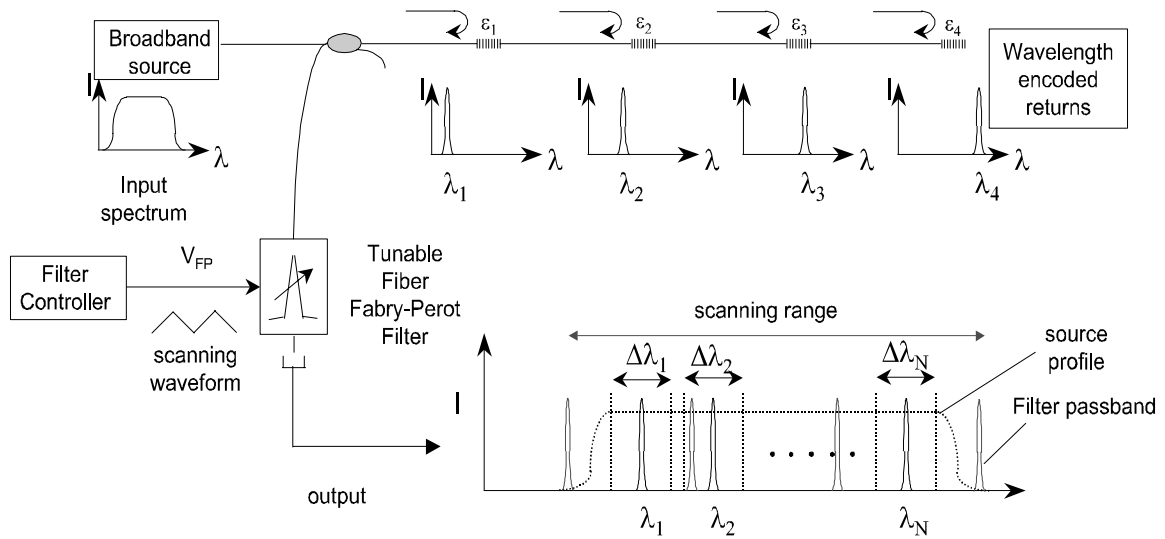


그림 1 광원을 이용한 FBG 센서의 Multiplexing.

### 3. 계측사면

본 연구에 적용된 사면은 경상남도 김해시 주촌면 내삼리 산 163번지 인근에 위치한 내삼농공단지로 대절토사면이다(그림 2). 지질 특성은 전반적으로 안산암(응회암) 지역으로 나타났으며, 현 절취사면의 지층 상태는 상부로부터 풍화토, 풍화암, 그리고 그 하부에는 기반암인 연암의 순으로 분포 되어있다. 특히, 상부 풍화토의 입도 구성은 조사위치에 따라 다르나, 점토에 다량의 자갈(암편)이

혼재되었고, 지반상태가 비교적 느슨한 것으로 나타났다.

상기 사면은 당초 단지 조성계획에 따라 절취공사 중, 집중호우로 인한 1차 붕괴가 발생한 98년 2월 이후부터 99년 8월초까지 4~5회 걸친 간헐적인 국부파괴가 계속 되어왔으며, 보강 직전까지 활동영역이 전반적으로 확산되어 가고 있는 실정이었다. 더욱이 1차 붕괴 이후 사면보강대책으로 억지말뚝을 사면 외곽에 설치하여 안정도모를 시도하였으나, 전체적인 활동 억제 효과를 거두지 못하고 있는 실정이었으며, 일부에서의 국부적인 병



그림 2 절취사면의 붕괴 전경도.

진 활동이 계속해서 발생해 오고 있었다.

이로 인한 보강은 2000년 2월부터 Soil Nailing공법으로 시행되어졌으며, 사면해석에 따른 보강내역은 Nail 평균길이 15m(상부 5단 18m, 중앙 38단 15m, 하부 5단 12m)로 총 48단으로 배치했을 경우, 우기시 허용안전율을 만족하도록 설계되었다.

#### 4. Soil Nail의 응력경로

본 계측사면내 Soil Nail은 그림 3~6에 보이는 바와 같이, 재료의 한계기준치에 가까울 만큼의 아주 큰 힘을 받고 있음을 알 수 있다. 시공된 모든 Nail의 7~9m 지점에서 가장 큰 변형율을 보이고 있으며, 이를 연결하여 계측사면의 가상활동 파괴면을 가정할 수 있다.

사면의 전반적인 상황은 2001년 6월 현재, 심화된 지반균열과 Shotcrete 파손 등, 총 27곳으로 확인되었다.

대부분의 경우 법면 최상단 인접사면과의 경계지역에 집중되어 있고 중단 및 하단에서의 Shotcrete의 파손이 심한 상태이며, 균열 및 Shotcrete 파손의 진행이 더욱 확산되어 가고 있는 실정이다.

#### 5. 지하수 및 지반온도의 영향

김해 내삼 농공단지내 비보강 인접사면의 불안정한 상태가 계속되어, 보강영역과 비 보강영역 경계면을 중심으로 함몰에 의한 균열과 공동이 발생하면서, 그 틈으로 강우로 인한 지표수 및 지하수가 침투 되고 있다. 이로 인해 Shotcrete 배면에서는 수압과 토압이 가중되어 Shotcrete 표면을 파손한 것으로 보여진다. 특히, 층리 형태의 지반이 물과 함께 Sloughing 됨으로서 Shotcrete 배면 일부에서는 배면 지반과의 이완으로 인한 심한 공동현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 식생 시공을 위한

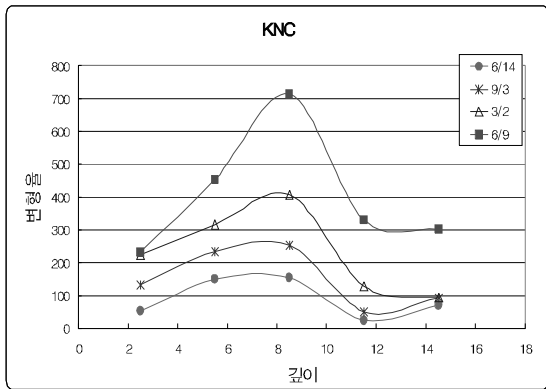


그림 3 김해사면 C-Soil Nail 응력경로.

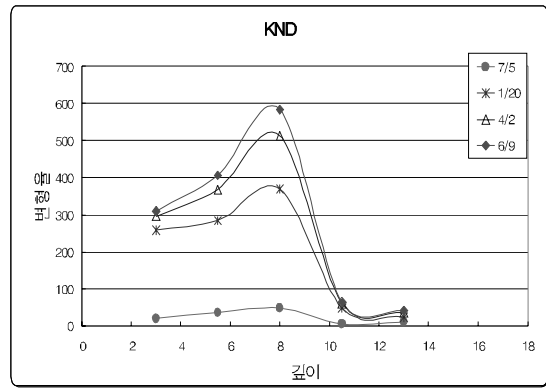


그림 4 김해사면 D-Soil Nail 응력경로.

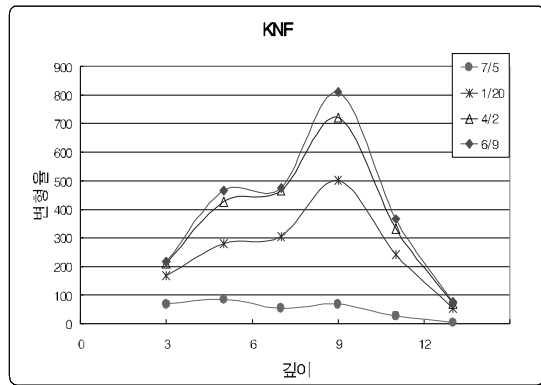


그림 5 김해사면 F-Soil Nail 응력경로.

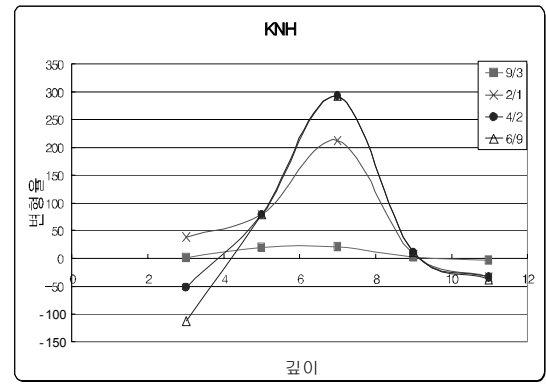


그림 6 김해사면 H-Soil Nail 응력경로.

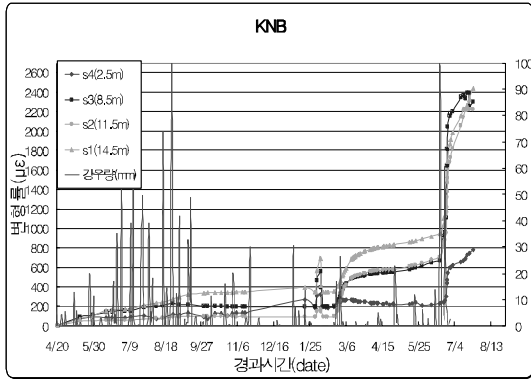


그림 7 김해사면 B-Soil Nail 응력경로와 강우량.

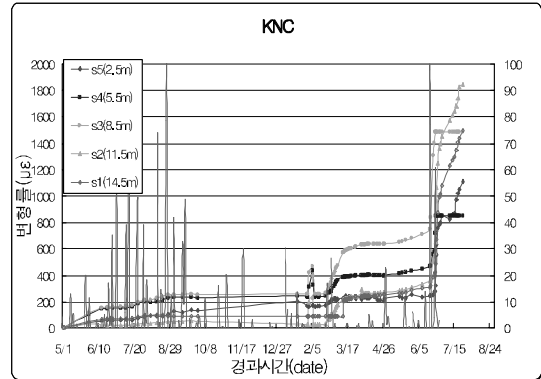


그림 8 김해사면 C-Soil Nail 응력경로와 강우량.

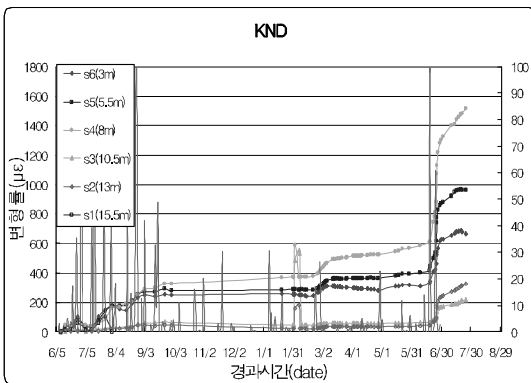


그림 9 김해사면 D-Soil Nail 응력경로와 강우량.

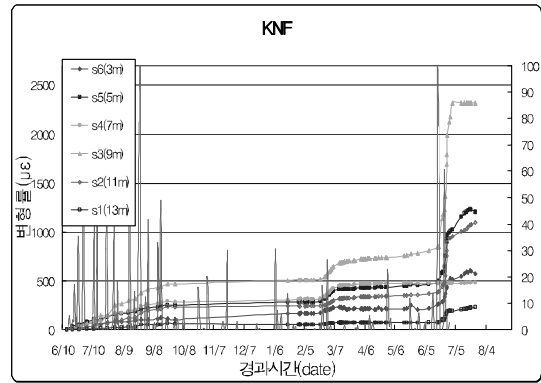


그림 10 김해사면 F-Soil Nail 응력경로와 강우량.

소단 천공으로 인한 미세한 인장균열을 더욱 악화시켜 Shotcrete 처리한 단락이 그대로 내려 앉게되었다.

그림 7~10 을 보면 2001년 6월중순부터 응력의 변화가 급격히 증가하였는데 이것은 2001년 월별 강우량을 그림에서 볼 수 있듯이 급년 6월 18, 19, 24일에 약 200mm 이상의 강우가 집중된 영향으로 보여진다. 1월부터 6월까지의 강우량이 월 평균 수십mm에 불과하였으며, 그 시기에 전국적인 심한 가뭄을 겪고 있었다. 이러한 가뭄이 계속되는 시기의 지반은 지반자체가 보유하고있는 함수량이 말라버림으로서 겔보기 점착력 (Apparent cohesion)이 제거되어 있는 상태라 할 수 있다. 이러한 지반에 갑작스런 집중호우로 인해 포화상태의 지반 단위중량증가로 인한 지반거동으로 사료된다.

또한, 2001년 2월말경부터 3월초에 모든 Soil Nail에 작용하는 응력이 갑자기 증가되었음을 알 수 있다. 이는

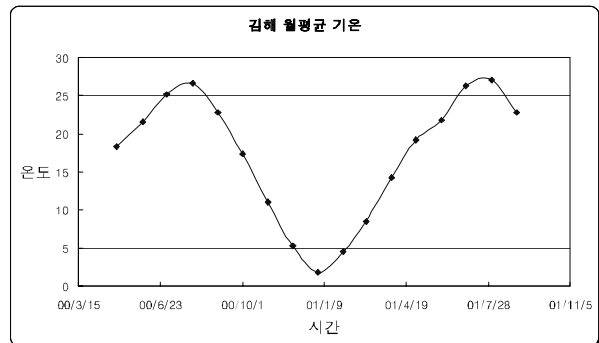


그림 11 김해지역의 월평균온도.

해빙기의 온도상승으로 인한 지하수의 변화 및 사면의 연화작용으로 많은 응력이 Soil Nail에 가해졌음을 알 수 있다.

그림 12~16에서, 김해 지역의 월평균온도(그림 11)와 비교했을 때 지표온도의 계절적 온도 변화와 무관한

향온심도는 8m~10m라 추정할 수 있다.

이는 본 사면의 Soil Nail의 변형률이 가장 급격한 구간인 지하 7~8m 구간을 사면 활동구간이라 추정할 때 (그림 3~6), 그 이하에서 향온심도가 존재하는 것을 알 수 있다.

그림 12~16에서 계측 사면의 향온심도에서의 온도 편차는 연중 1.5°C 미만인 것을 알 수 있다. 이는, 물의 비열이 지반의 비열보다 매우 크므로, 본 사면의 향온심도에서는 지하수가 존재한다고 추정할 수 있으며, 지하수위계를 이용한 지속적인 계측결과에서 지하수위는 9.5~12m로 나타났다. 기반암인 연암층이 불투수성이라 가정할 때 불포화 시 즉, 건기 시에는 연암상단에 지하수위가 형성되고, 집중호우 시에는 지하수위가 상부 풍화토층 깊이의 약 (2/3)선까지 상승되었다.

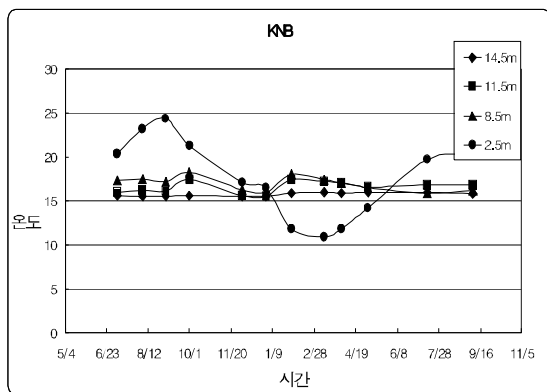
계측 데이터를 바탕으로 계측사면의 가상활동 파괴

면과 향온심도, 사면의 지하수위를 그림으로 표현하였다.

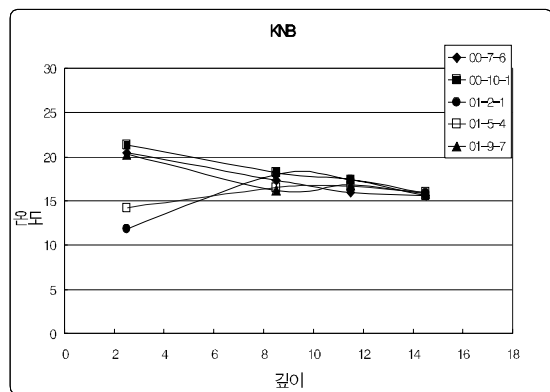
그림 17에서 가상활동 파괴면은 연암층 바로 위에 지점(7~8m)에서 이루어지고, 그림 18에서 향온심도 역시 연암층 바로 위에 지점(8~10m)에서부터 분포함을 알 수 있다. 그리고 그림 19에서 우기시에는 지표부근 풍화토 부근에서 지하수위를 나타내고 건기시에는 불투수층인 연암층에서 지하수위를 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 항상 연암층(9.5~12m) 이상의 깊이에서 지하수가 존재함을 알 수 있다.

### 6. 결론

연구 대상 사면인, 김해 내삼농공단지 사면에 설치된 FBG Sensor의 계측치를 바탕으로 다음과 같은 결론을

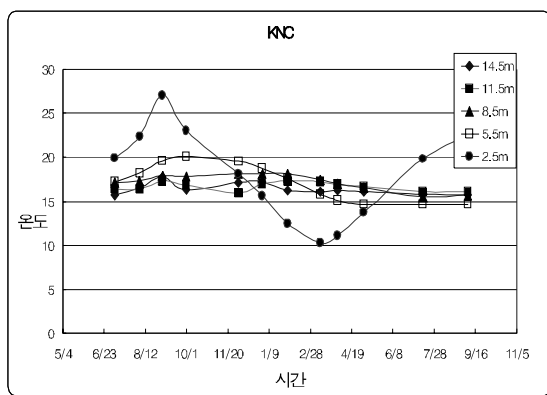


a. 시간-온도

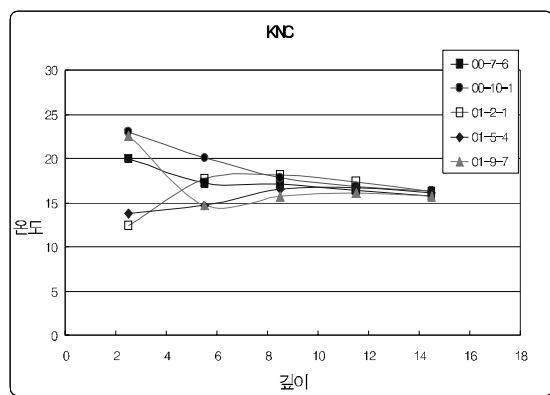


b. Nail의 깊이-온도

그림 12 김해사면 B-Soil Nail.

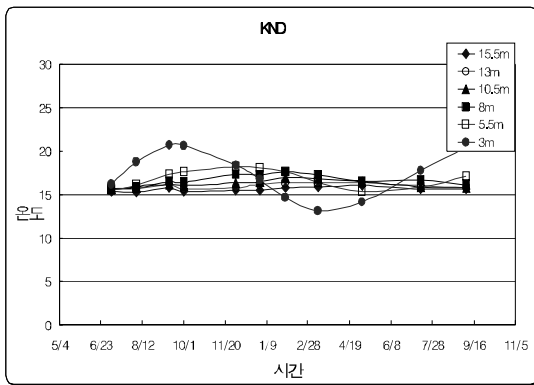


a. 시간-온도

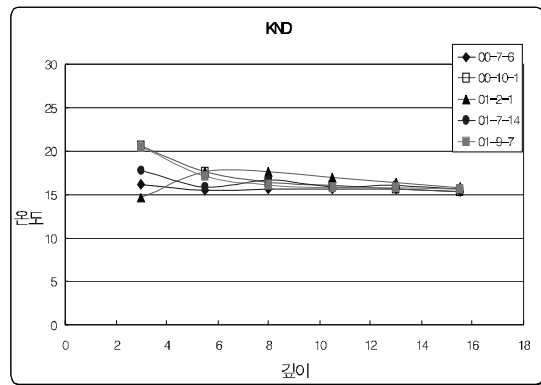


b. Nail의 깊이-온도

그림 13 김해사면 C-Soil Nail.

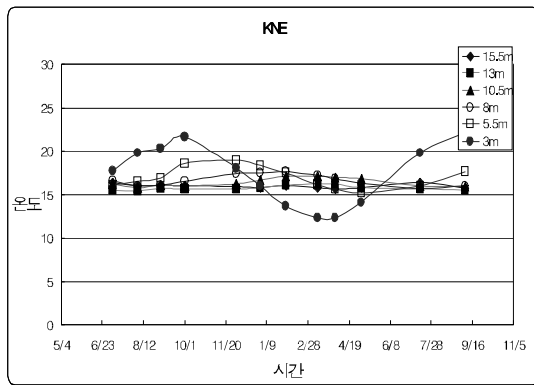


a. 시간-온도

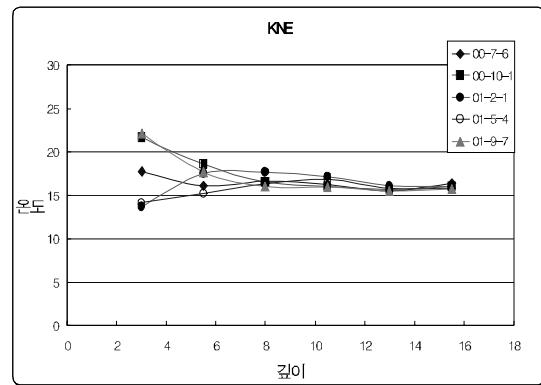


b. Nail의 깊이-온도

그림 14 김해사면 D-Soil Nail.

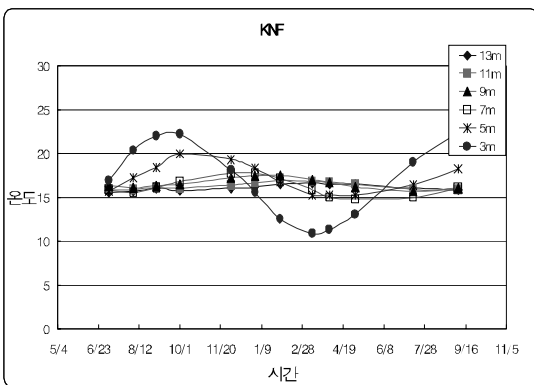


a. 시간-온도

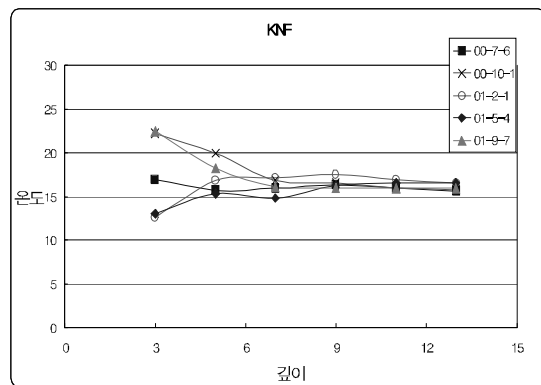


b. Nail의 깊이-온도

그림 15 김해사면 E-Soil Nail.



a. 시간-온도



b. Nail의 깊이-온도

그림 16 김해사면 F-Soil Nail.

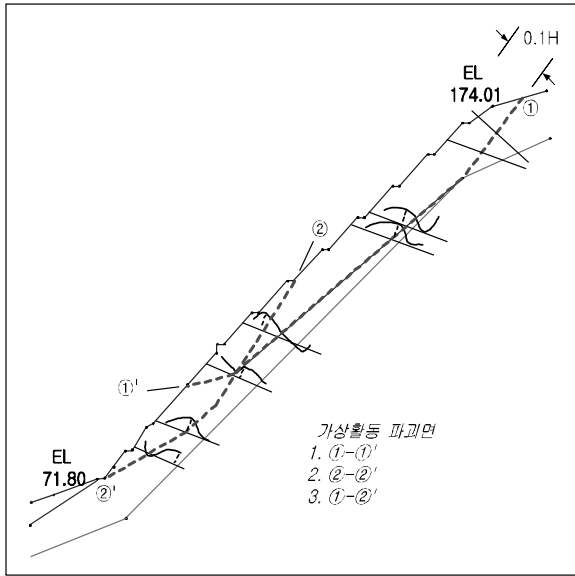


그림 17 김해사면의 가상활동파괴면.

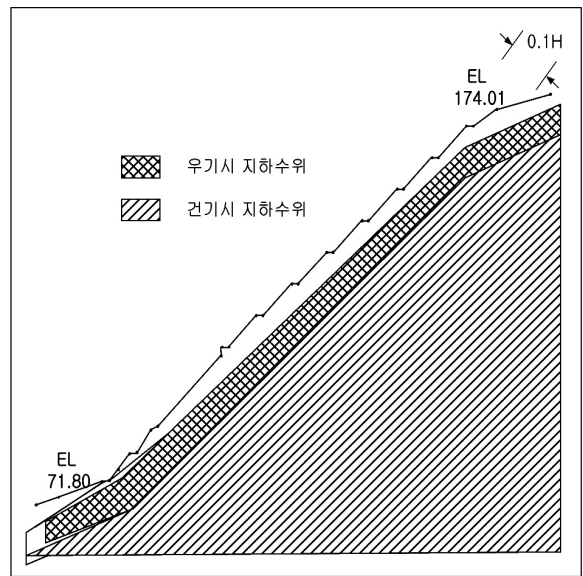


그림 19 건기시 및 우기시 지하수위.

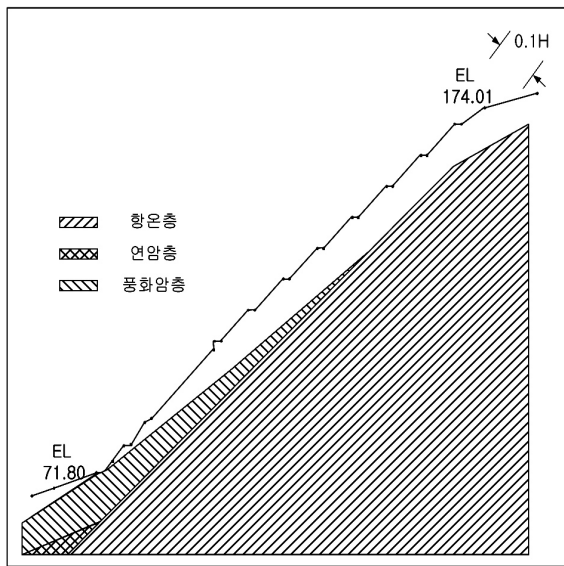


그림 18 김해사면의 향온심도 및 암경계면.

유추할 수 있었다.

1. 본 계측 사면의 Soil Nail에 부착된 FBG Sensor의 계측치 분석 결과, 지하수의 깊이, 사면지반의 지질 종류와 분포형태가 각 사면의 향온심도를 결정하는

중요한 요인이다.

2. 계측사면에서 향온심도와 가상활동 파괴면이 거의 일치함을 볼 수 있다. 그러므로, 사면 내 지중온도의 측정으로 사면의 거동과 안정성을 예측할 수 있으며, 궁극적으로 사면보강 설계에 반영할 수 있을 것이다.
3. 지하수계와 FBG Sensor의 계측데이터의 비교 분석 결과, 지하수가 존재하는 영역 아래에서는 지중의 온도 변화폭이 작음을 알 수 있다. 이는 지중온도의 측정시 향온심도에서의 온도 변화폭이 미소할 경우, 사면안정의 중요한 요인으로 작용하는 지하수의 유무를 판단할 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

K.T. Chang & G.W.E.Milligan, "Effect of the transition zone in a nailed wall model test" University of oxford, UK, 1996.  
 한중근, "역지말뚝으로 보강된 절개사면의 강우시 거동", 한국지반공학회지, 02 v.12, n.1, pp35-46 1225-9632, 1996  
 이우진, "광섬유 센서에 의한 말뚝 하중전이 측정", 한국지반공학회, pp.397-404  
 장기태, 한상목, 김경태, 유원위, "FBG센서를 이용한 철근 콘크리트의 휨거동 실험", 구조/원자력2000학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.469-472 (2000)  
 장기태, 강창국, 홍성진, 정경선, 김성환, 박권제, 이원효, 김경태, "광섬유격자센서를 활용한 사면거동 실시간 안전 진단 시스템",

지반공학회 사면안정기술위원회 학술발표회, pp.59-79 (2001)  
장기태, 권병근, 이선경, 남궁한, 유병신, 김경태, “네일로 보강된 구조물에서의 변이영역과 변형률 분포”, 지반공학회 사면안정기술위원회 학술발표회, pp.233-248 (2001)  
윤기재, 보강토의 강도특성에 관한 보강효과의 실험적 연구, 금오공대 토목공학과 석사논문, 1989

남궁한, 보강 옹벽구조물의 변이 영역에 관한 실험연구, 금오공대 토목공학과 석사논문, 1993  
권병근, 대절토 사면안정을 위한 Nailing공법과 현장계측 분석에 관한 연구, 금오공대 토목공학과 석사논문, 2000  
강창국, 현장계측을 통한 억지말뚝 분석에 관한 연구, 금오공대 토목공학과 석사논문, 2000

---