

지중온도에 의한 사면의 거동 예측

Estimation of Slope Behavior by Soil Temperature

장 기 태*¹ Chang, Ki-Tae

한 희 수*² Han, Heui-Soo

유 병 선*³ Yoo, Byung-Sun

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 surface resulting from weathering effect and other factors. The FBG(Fiber Bragg Grating) sensor system is used to estimate the correlations between the soil temperature and the slope behavior, and to find a failure surface in slopes effectively. This research is to seek for the correlation between the soil temperature distribution and the strain distribution of the reinforcing materials in an active zone by analyzing the data from the in-situ measurement so that the possible failure surface should be well defined based on the correlation. The zone of high temperature fluctuation can be regarded as one of the possible failure surface due to the weathering effect while the constant temperature depth of the ground, if exists, would not be relatively affected by the weathering process.

요 지

지반의 풍화, 지하수의 유출입 및 대기온도의 변화 등, 사면 내 토립자의 물성을 변화시킬 수 있는 요인에 대한 영향과 이로 인한 사면의 파괴면을 예측할 수 있다면, 사면에 대한 장기 안정성을 확보하는데 도움을 줄 것이다. 사면의 거동에 영향을 미치는 여러 요인들 가운데, 지중 온도의 변화는 지하수 및 토립자의 물성을 변화시켜, 사면의 붕괴에 많은 영향을 끼치므로 사면내의 온도의 변화구간과 항온 구간을 구분할 수 있다면, 사면의 가상 파괴면을 예측할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 사면 현장에 설치된 상용계측기 및 광섬유를 이용한 계측기(FBG Sensor)의 사면 계측 데이터를 바탕으로, 사면 보강재의 변형에 의한 사면의 가상활동 파괴면의 추정과 지중온도가 변하지 않는 깊이인 항온심도의 결정, 그리고 이들의 연관성을 검토하였다. 본 연구의 검토결과, 사면 보강재에 의해 결정된 사면의 가상 파괴면과 지반 내 항온심도가 거의 일치하였으며, 지하수의 유무가 지반내 항온심도를 결정하는 중요한 요인임을 알 수 있었다.

Keywords : FBG sensor, Slope stability, Soil temperature distribution, Strain distribution

1. 서 론

사면의 붕괴를 유발하는 요인은 지반의 풍화, 지하수의 유입, 대기온도의 변화 등 매우 다양하다. 이 중 온

도의 변화는 지하수 및 토립자의 물성을 변화시켜, 사면의 붕괴에 많은 영향을 끼치므로, 사면내의 온도의 변화 구간과 항온 구간을 구분할 수 있다면, 사면의 파괴면을 예측할 수 있을 것이다. 이 가상활동 파괴면을

*1 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh Uni. of Tech., ktchang@kumoh.ac.kr)

*2 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh Uni. of Tech.)

*3 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh Uni. of Tech.)

추정하여 사면의 거동과 안정을 예측하고, 나아가 사면 안정 설계 및 계측에 반영할 수 있다.

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

2. 계측시스템

2.1 FBG 센서

본 연구에서 사용된, 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. 이 FBG 센서는 경계면 응력 측정 시험기 및 LVDT를 이용한 실내시험에 의하여 FBG 센서의 calibration이 행해졌다. 그림 1은 연구 대상사면에 적용된 FBG 센서가 설치된 FRP soil nail들로 대상사면의 상부를 보강하기 위하여 사용되었다(장기태, 2001).



그림 1. FBG센서가 설치된 FRP Soil Nail

2.2 변형률계(Vibrating Wire)

역지말쪽에 걸리는 응력의 증감량을 파악하기 위하여 본 연구에 사용된 V/W는 진동현식(Model GK-4000) 타입으로 측정범위는 $\pm 1500 \mu\epsilon$ 까지 측정 가능하고 측정정밀도는 $0.1 \mu\epsilon$ 이며, 사용온도 범위는 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$ 로서 stainless 재질로 되어있다.

설치하고자 하는 위치에 녹 및 이물질을 제거하고 나서 strain gauge의 양 block을 arc 용접했다. Joint sealing kit을 이용하여 측정위치까지 cable을 연결한 다음 센서 보호 캡을 씌운 후 방수를 위해 실리콘으로 도포했다.

그림 2는 역지말쪽에 용접된 V/W를 보여주며, 그림 3은 FBG 센서와 V/W 센서가 함께 부착된 rock bolt 이다.

3. 현장개요

3.1 연화재사면

본 사면은 경부고속도로 서울기점 부산방향으로 279km 지점에 위치한 대절토 사면으로, 지질학적 특성은 암반의 풍화 정도가 불규칙하게 발생되어 우수 침투 시 붕락이 발생할 가능성이 있는 지층으로 판단된다. 또한, 사

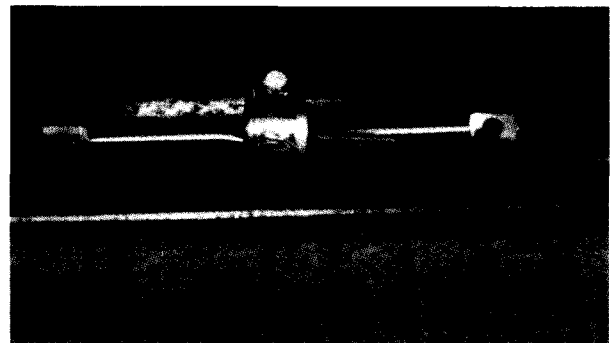


그림 2. 역지말쪽에 용접된 V/W

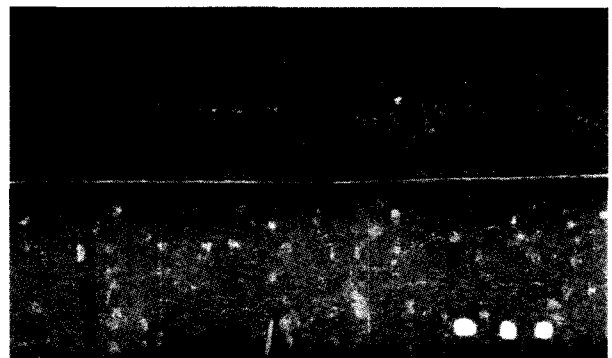


그림 3. FBG와 V/W 센서가 부착된 Rock Bolt

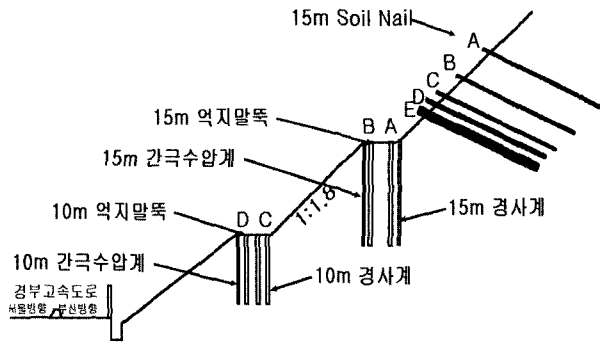


그림 4. 연화재사면의 계측기 설치도

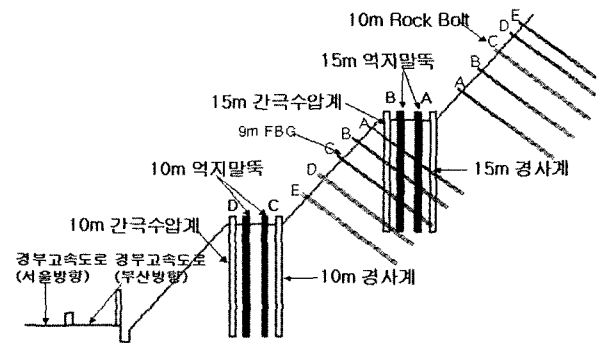


그림 5. N사면 계측기 설치도

면 전반에 걸쳐 사암과 역암이 우세하게 발달되어 있으며, 부분적으로 이암과 셰일이 혼재하여 전체적으로 균열 및 절리가 발달되어 있고, 역암층내에서는 흑색 셰일이 분포하며 균열면에 점토 충전물이 충전되어 있다.

그림 4에서 보는바와 같이 사면 우측은 층리 및 절리가 복잡하게 발달, 용출수가 많아 우기 시 강도저하로 인한 붕괴가 예상 되어 soil nail, rock bolt, 수발공으로 보강을 실시하였다(권병근, 2000).

또한 사면 중앙 좌측 2단 소단에 80m 가량의 인장균열(99년 9월)이 발생되었고, 대규모 층리면이 발달하여 사면 전체 거동이 예상되어 rock-anchor, 역지말뚝, rock bolt, soil nailing으로 보강을 실시하였다(그림 4).

3.2 신동재사면

본 사면은 경부고속도로 서울기점 부산방면으로 282km 지점에 위치한 대절토사면으로, 지질학적 특성으로는 소규모 단층대를 포함한 퇴적암층으로 사암과 역암 및 부분적으로 이암과 셰일이 분포하고 있으며, 약한 셰일 층사이의 층경계를 따라 지하수가 비치고 있다. 지층을 경계로 지하수가 확산되면서 지하수 침투범위내에서 풍화가 심하게 나타나며 절리면을 따라서 gouge가 충전되어 부분적으로 불안정한 요소로 작용하고 있다.

사면 절취 및 활동에 대한 보강으로는 사면 우측으로 풍화가 심하고 지하수 침투시 붕괴가 예상되어 soil nailing, rock bolt로 보강하였다. 사면 중앙은 층리 및 파쇄대의 발달로 붕괴가 예상되어 rock bolt로 보강하였고, 사면 4단 소단 상부는 실트질 사암으로 풍화가 심한 층리면으로 인한 붕괴가 예상되어 soil nailing으로 보강하였다. 사면 좌측은 구배 변화구간으로 층리가 발달되어 층리 사이로 점토가 충전되어 있고, 상부는 파쇄대가 상당히 심하여 활동가능성이 커 역지말뚝, rock bolt, soil

nailing 보강을 하였다(그림 5).

3.3 김해 사면

본 사면은 경상남도 김해시 인근에 위치한 농공단지 내 대절토사면이다.

지질 특성은 전반적으로 안산암(응회암)지역으로 나타났다, 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.

4. 계측기의 보정

4.1 온도보정

지중 온도를 지배하는 요인은 태양열의 흡수량, 지표수의 침투정도, 지각 내부의 지열, 암석의 발열 및 열전도율, 대수층 오염 정도 등을 들 수 있다. 이중 지각 내부의 지열이 가장 큰 요인으로 작용하며, 암석의 발열 및 열전도율은 상대적으로 깊이 않은 심도에서는 제일 크게 작용한다.

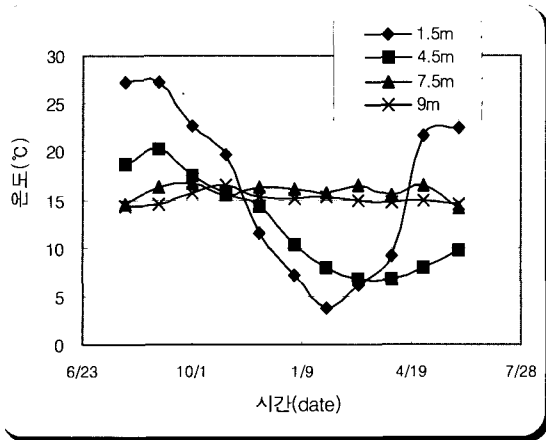
태양열의 흡수량이 얼마만큼의 깊이까지 영향을 미치는가에 대한 연구 즉, 계절적인 영향으로 인한 온도 변화가 얼마의 깊이까지 미치는가에 대한 연구가 아직까지 정량적으로 나온 데이터가 없는 실정이다. 이와 같이 태양열에 의해 영향을 받는 깊이 이하에서는 상대적으로 계절적인 변화가 적기 때문에 본 논문에서는 항온 심도라고 정의하였다(홍성진, 2001).

항온심도에서는 암석의 발열 및 지각 내부의 지열 그리고 지하수의 요인에 의해 지온이 결정되며, 본 데이터의 측정 깊이에서는 지각 내부 지열의 영향이 극히 미소

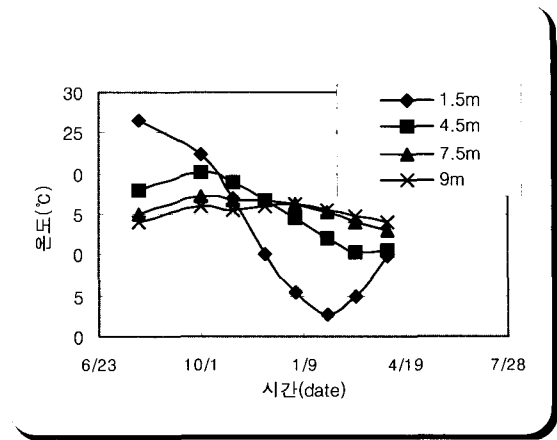
하므로 해석과정에서 무시되었다.

연구 사면에 설치된 FBG sensor는 별도의 온도 sensor를 설치하지 않았다. FBG sensor의 계측 데이터 값은

사면 거동에 의한 변형을 값과 지중온도의 영향이 포함된 값이다. 이를 보정하기 위해 같은 위치에 설치된 FBG 센서의 변형률 값에서 V/W의 변형률 값을 빼준

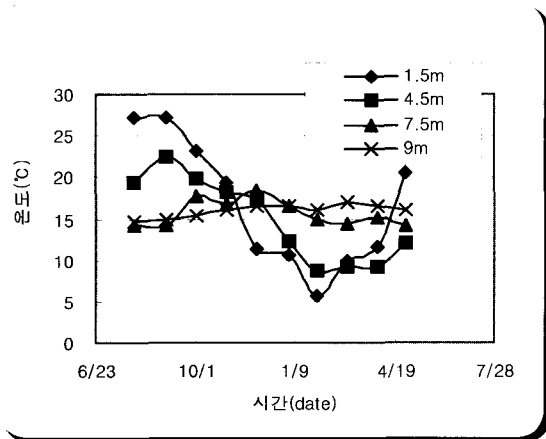


(a) FBG Sensor의 온도보정

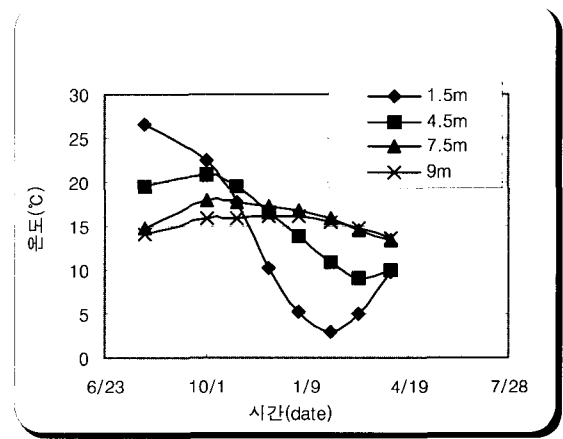


(b) V/W 온도

그림 6. 신동재사면 C Rock Bolt의 온도보정

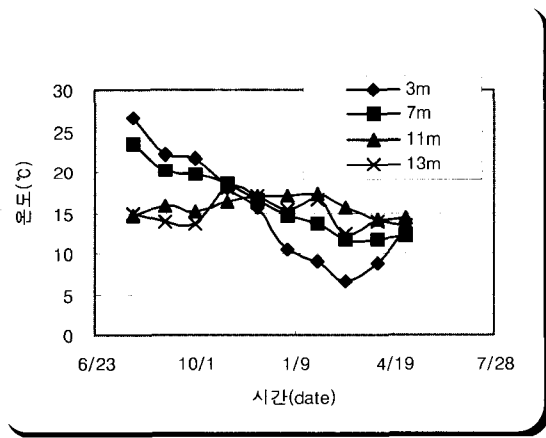


(a) FBG Sensor의 온도보정

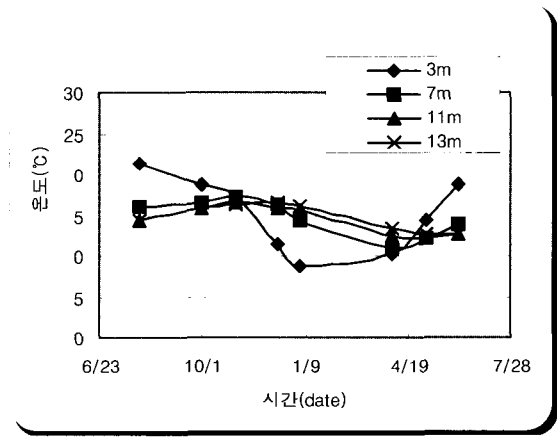


(b) V/W 온도

그림 7. 신동재사면 E Rock Bolt의 온도보정



(a) FBG Sensor의 온도 보정



(b) V/W 온도

그림 8. 연화재사면 B Soil Nail의 온도보정

값이 온도에 의한 영향으로 보고, 실내 시험에서 나온 보정치로 환산을 하여 그래프를 그렸다.

FBG sensor의 실 계측치를 보정하여 온도만을 나타낸 것이 그림 6~8(a)이며, 그림 6~8(b)는 같은 위치에서 측정한 V/W 값이다. 두 그림을 비교하여 보면 절대치에는 다소 차이가 있지만 각 위치별로 지중 연중 온도 변화는 거의 일치하는 경향을 볼 수 있다.

4.2 변형률보정

그림 9~10은 연화재 사면에 설치된 억지말뚝 변형률의 계측결과를 보여준다.

그림 9는 동일한 억지말뚝의 6m 지점에 같이 설치된 V/W gauge와 FBG sensor의 온도 보정 전후의 계측결과이며, 그림 10은 10m 지점에 같이 설치된 두 계측기의 온도보정 전후의 계측결과이다. 그림 9(a) 및 그림 10(a)에서 보듯이, FBG sensor의 온도 계측결과와 V/W

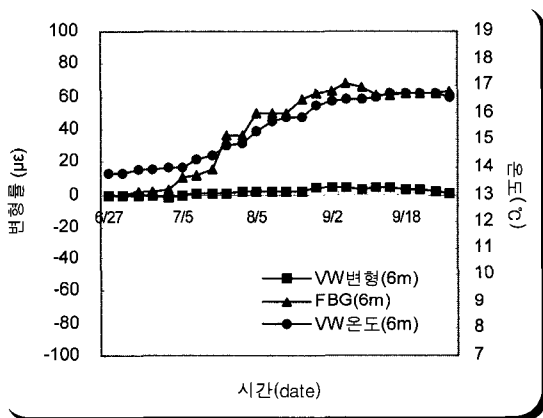
gauge의 온도 계측결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b) 및 그림 10(b)는 두 계측기의 변형률 계측결과가 거의 일치함을 보여준다. 그러므로, 이는 FBG sensor의 계측결과가 상당히 신뢰성이 있음을 증명한다.

5. 계측결과 및 분석

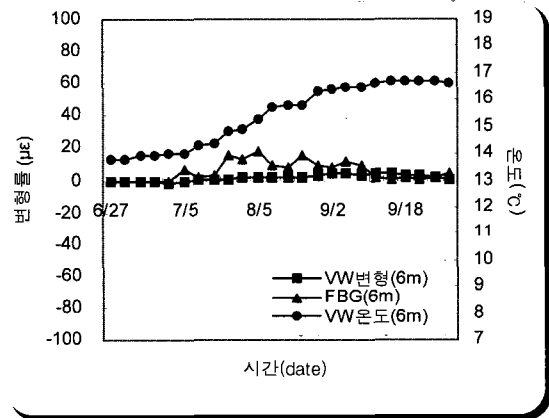
5.1 지중온도

5.1.1 연화재사면

그림 11~13은 시간 및 지반 깊이에 따른 soil nail에 설치된 계측기의 온도변화를 보여준다. 지표온도와 지중온도를 비교하여 볼 때 3m, 7m지점에서는 지표온도와 거의 흡사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있으며, 11m 및 13m 지점에서는 지표온도와 상관없는 온도의 변화를 볼 수 있다. 또한 3m 및 7m의 지점에서는 각각 8°C~23°C, 10°C~18°C의 큰 편차를 나타내고 있고, 반

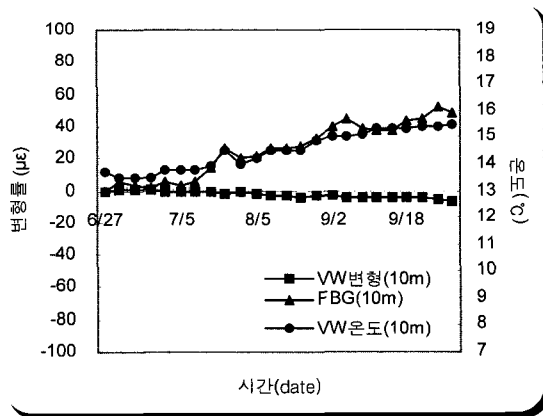


(a) 온도보정 전

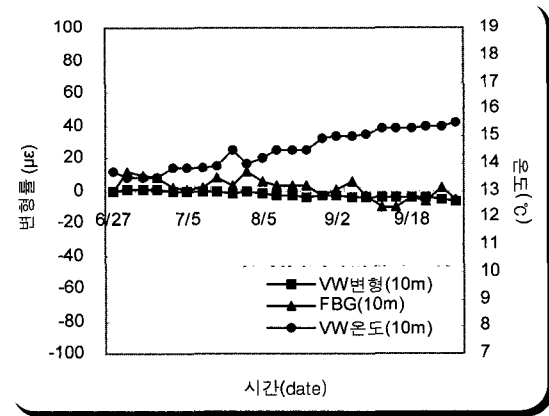


(b) 온도보정 후

그림 9. V/W와 FBG의 비교(6m)

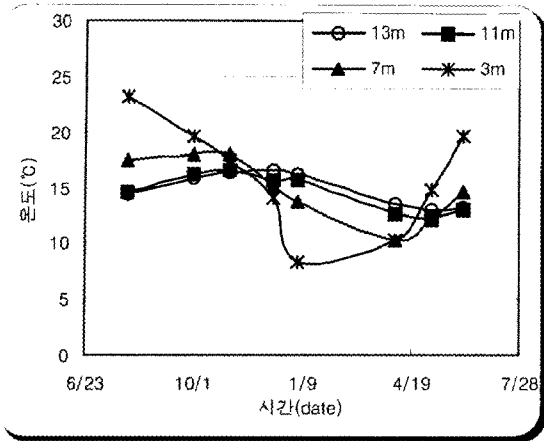


(a) 온도보정 전

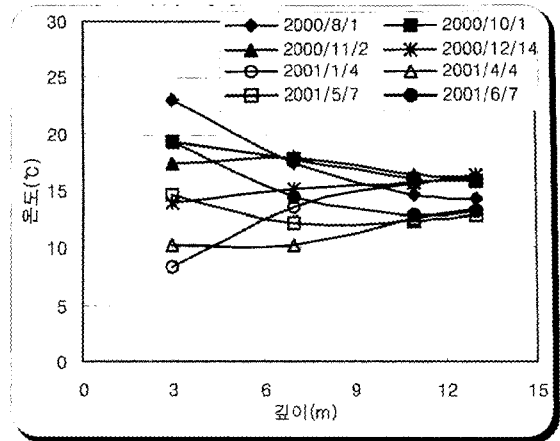


(b) 온도보정 후

그림 10. V/W와 FBG의 비교(10m)

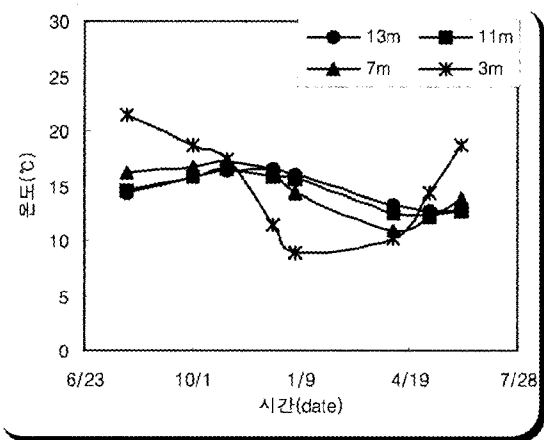


(a) 시간-온도

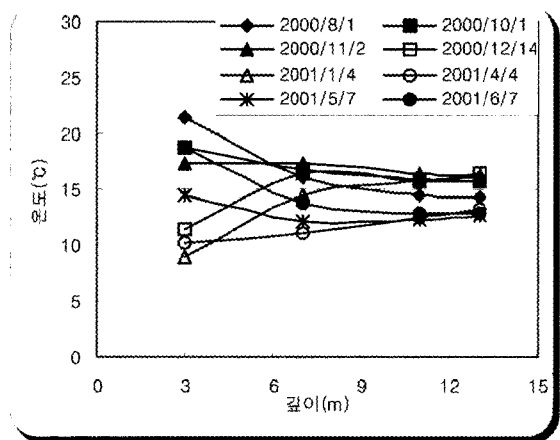


(b) Nail의 깊이-온도

그림 11. 연화재사면 A Soil Nail의 온도변화

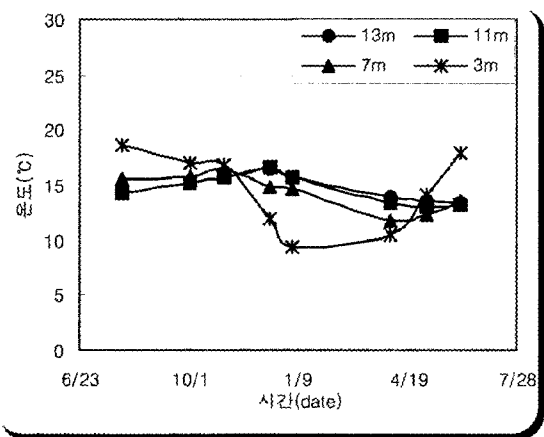


(a) 시간-온도

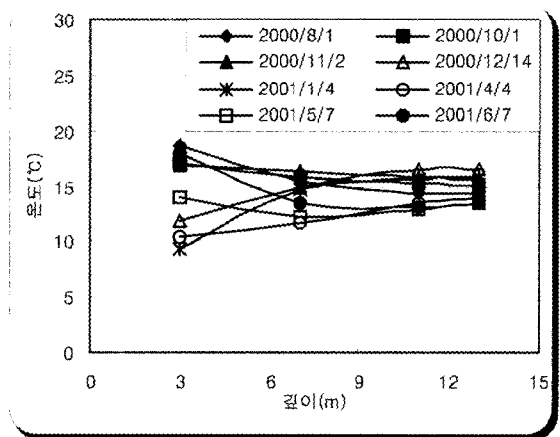


(b) Nail의 깊이-온도

그림 12. 연화재사면 B Soil Nail의 온도변화



(a) 시간-온도



(b) Nail의 깊이-온도

그림 13. 연화재사면 E Soil Nail의 온도변화

면에 11m 및 13m 지점에서는 13°C ~ 16.5°C, 12.5°C ~ 16.5°C로 4°C내외의 적은 범위 내로 온도의 수렴을 보이고 있다. 이를 통하여 8~9m 지점이 외부온도의 변화

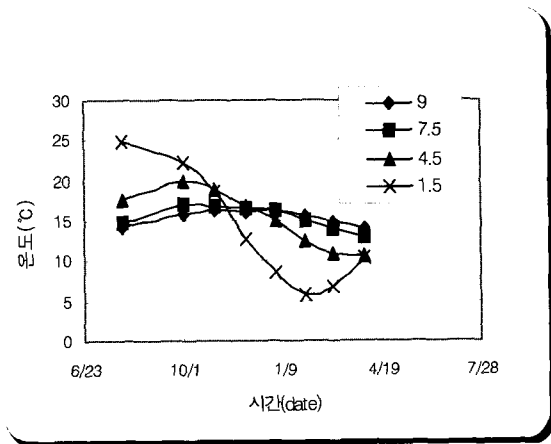
에 영향이 없는 항온 심도라 사료된다.

온도의 변화가 크게 작용하는 심도까지는 풍화의 정도가 크며, 공학적으로는 사면의 활동영역(active zone)

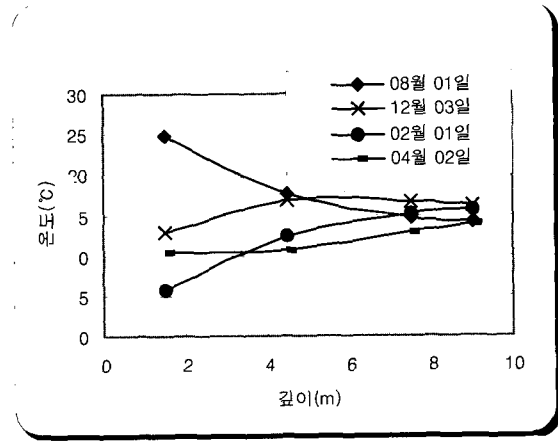
에서는 온도의 변화가 크며 저항영역(resist zone)에서는 상대적으로 온도의 변화가 미소할 것이다.

5.1.2 신동재사면

그림 14~17은 시간 및 지반 깊이에 따른, rock bolt에 설치된 계측기의 온도변화를 보여준다. 본 사면의 지

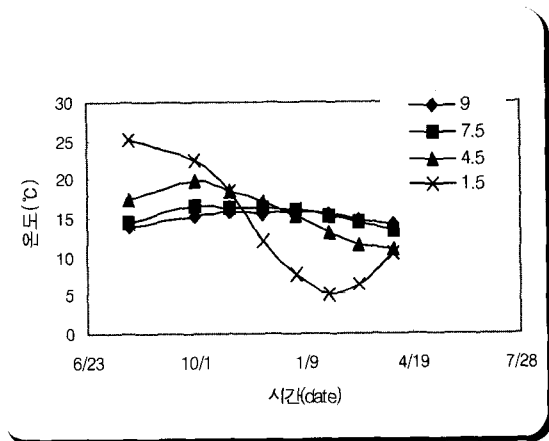


(a) 시간-온도

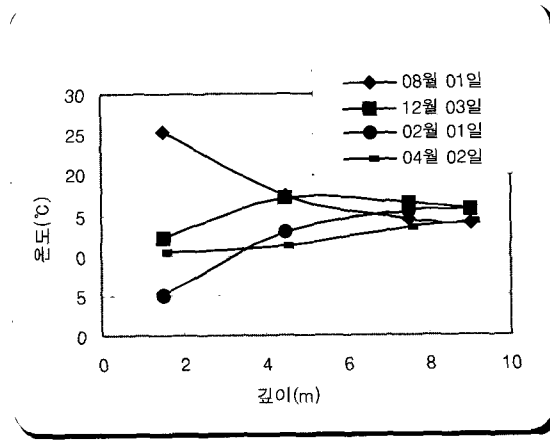


(b) Rock Bolt의 깊이-온도

그림 14. 신동재사면 A Rock Bolt의 온도변화

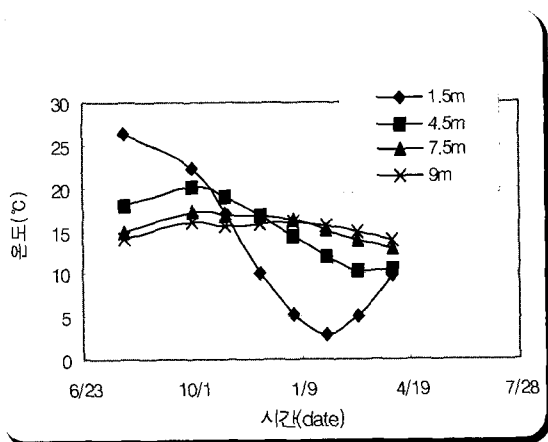


(a) 시간-온도

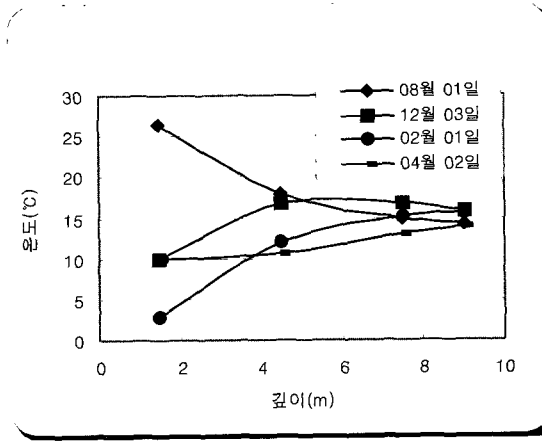


(b) Rock Bolt의 깊이-온도

그림 15. 신동재사면 B Rock Bolt의 온도변화

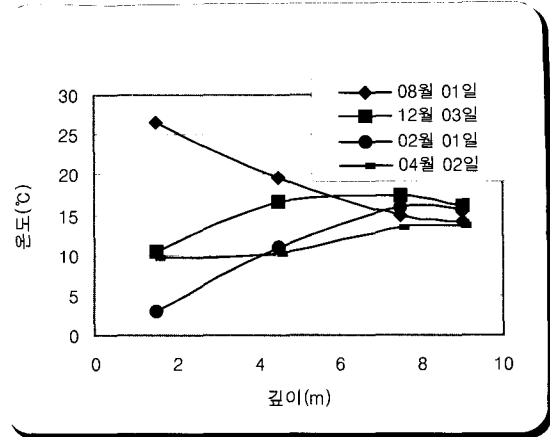
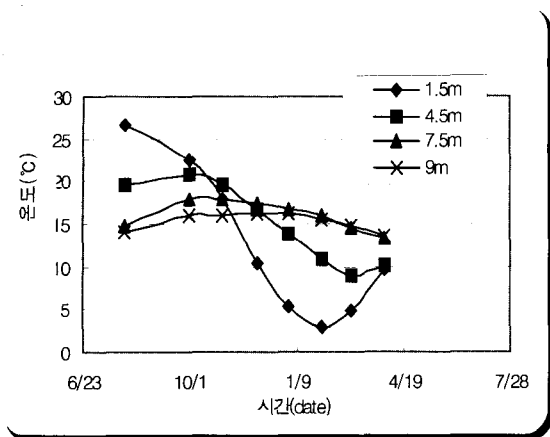


(a) 시간-온도



(b) Rock Bolt의 깊이-온도

그림 16. 신동재사면 C Rock Bolt의 온도변화



(a) 시간-온도

(b) Rock Bolt의 깊이-온도

그림 17. 신동재사면 E Rock Bolt의 온도변화

질학적 특성은 연화재사면과 거의 흡사한 역암과 사암, 그리고 부분적으로 셰일로 이루어져 있다. 이는 지중 온도의 열전도도의 특성상 연화재사면의 지중온도 분포와 일치한다고 가정할 수 있다. 그러나 그림 14~17에서 볼 수 있듯이 연화재사면의 경우보다 지표부근 심도에서 항온을 유지함을 알 수 있다. 즉, 연화재사면의 7m 부근에서의 연중 온도 편차는 8°C인 반면 신동재사면의 7m 부근의 연중 온도 편차는 4°C내외인 것을 볼 수 있다. 추가적인 조사가 필요하겠지만 이는 신동재사면의 우세하게 발달된 층리로 지하수의 영향을 받았을 것이라 사료된다.

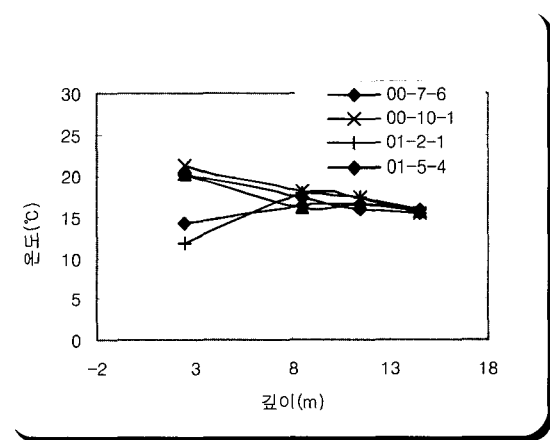
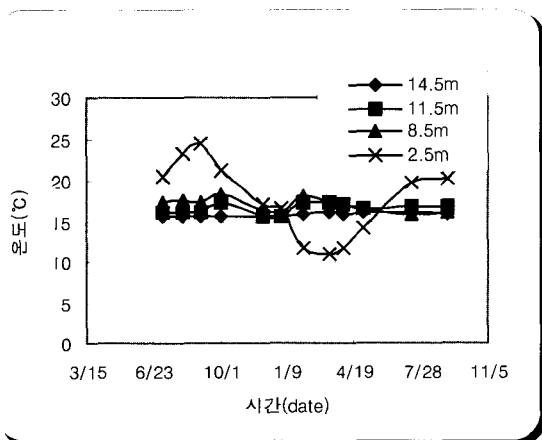
5.1.3 김해사면

그림 18~22에서 나타난 시간 및 지반 깊이에 따른

soil nail에 설치된 계측기에 의한 계측 data에서 지표온도의 계절적 온도 변화와 무관한 항온심도는 8m~10m라고 추정할 수 있다. 이는 본 사면의 가상활동 영역이 7~8m라고 추정할 때 그 이하에서 항온심도가 존재하는 것을 알 수 있다.

이러한 사실을 확인할 수 있는 것은, 지반조사결과에서 지하수위는 9.5~12m로 나타났으며, 기반암인 연암층이 불투수성이라 가정할 때 불포화 시 즉 건기 시에는 연암상단에 지하수위가 형성되고, 집중호우 시에는 지하수위가 상부 풍화토층 깊이의 약 (2/3)선까지 상승될 것으로 사료된다. 또한 배수공의 시공상 문제로 지하수위는 항상 연암층 깊이에서 존재할 것이라 사료된다.

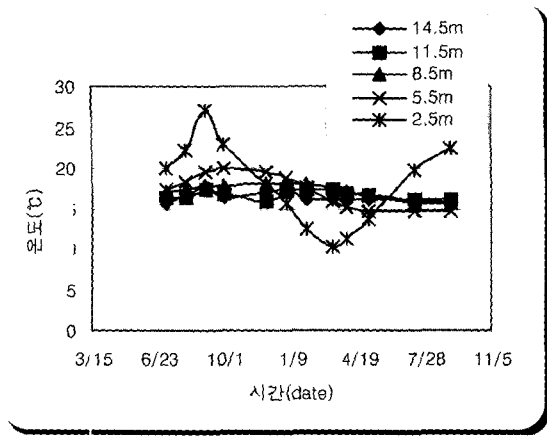
이를 바탕으로 김해사면의 가상활동 파괴면과 항온



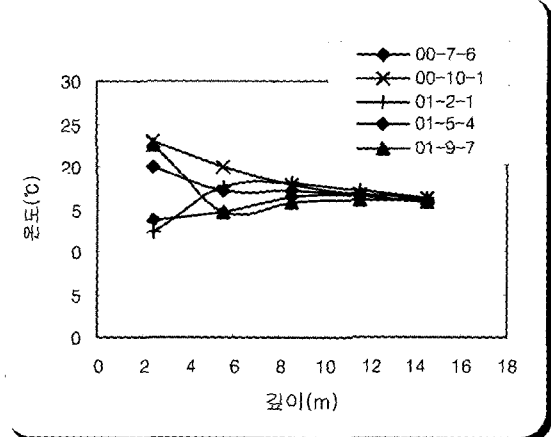
(a) 시간-온도

(b) Nail의 깊이-온도

그림 18. 김해사면 B Soil Nail의 온도변화

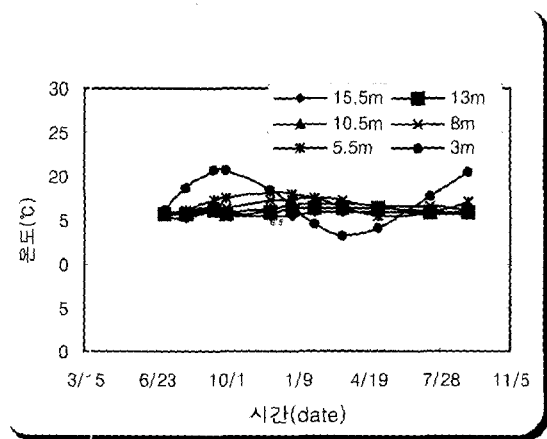


(a) 시간-온도

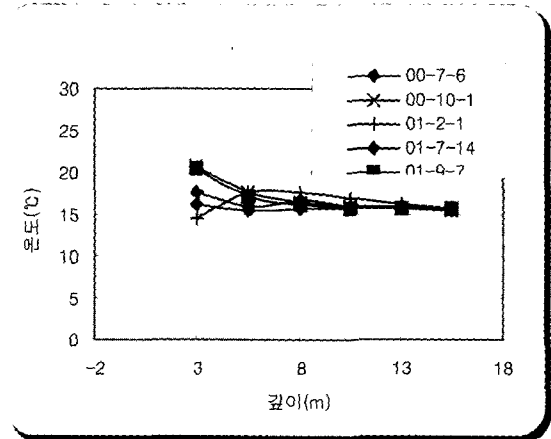


(b) Nail의 깊이-온도

그림 19. 김해사면 C Soil Nail의 온도변화

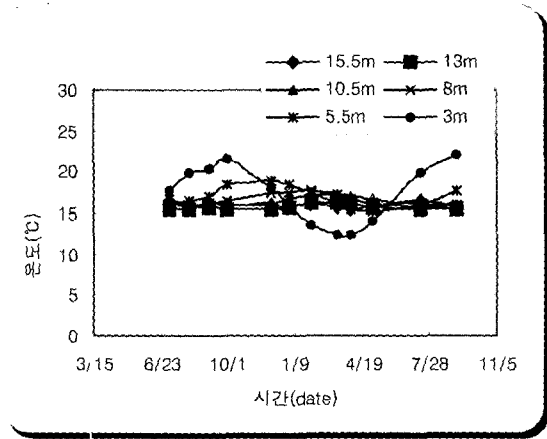


(a) 시간-온도

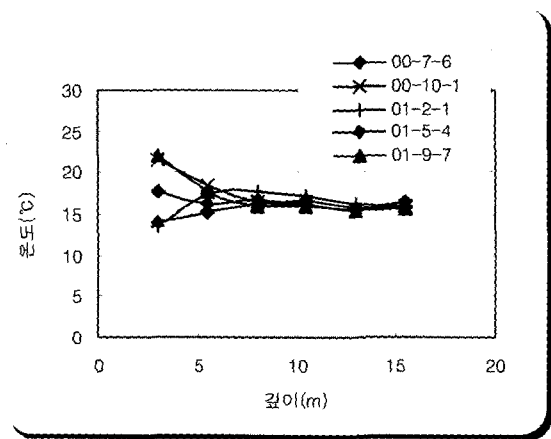


(b) Nail의 깊이-온도

그림 20. 김해사면 D Soil Nail의 온도변화



(a) 시간-온도

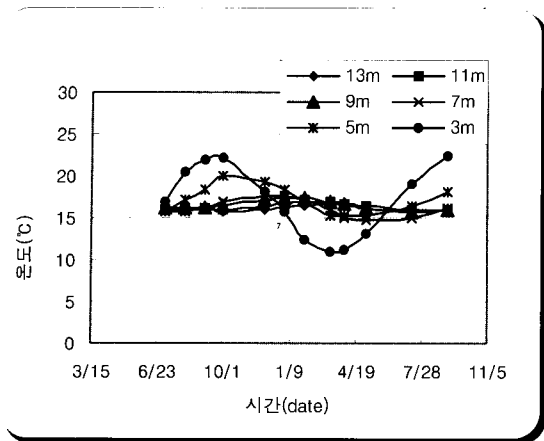


(b) Nail의 깊이-온도

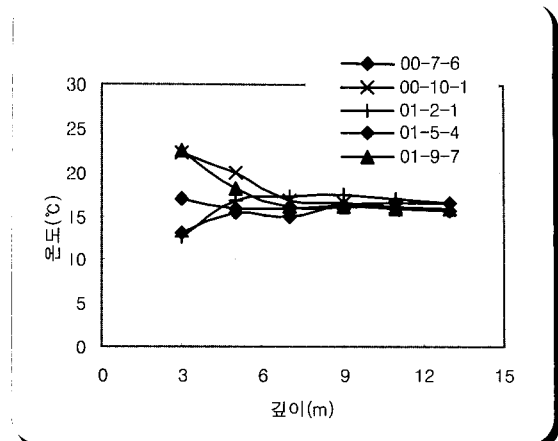
그림 21. 김해사면 E Soil Nail의 온도변화

심도, 사면의 지하수위를 그림으로 표현하였다. 그림 23은 김해사면의 향온심도 분포와 암경계면들을 보여주고, 그림 24는 soil nail(실선)의 최대 응력 변화 점들을

연결한 선(점선)들이 향온심도선과 연암층위를 지나고 있음을 알 수 있다.



(a) 시간-온도



(b) Nail의 깊이-온도

그림 22. 김해사면 F Soil Nail의 온도변화

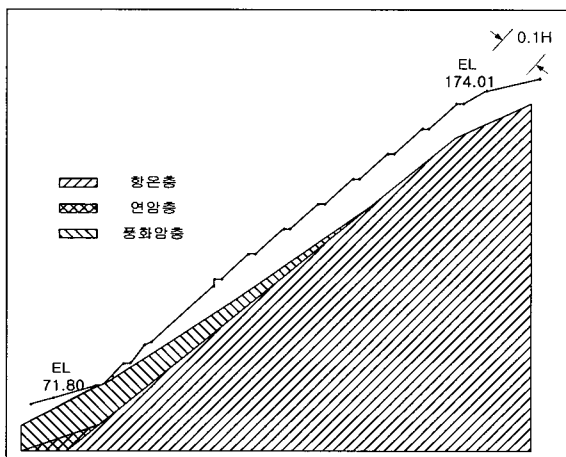


그림 23. 김해사면의 항온심도와 암경계면

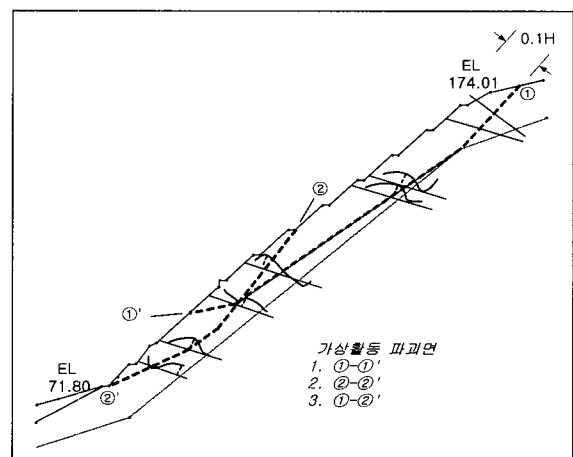


그림 24. 김해사면의 가상활동파괴면

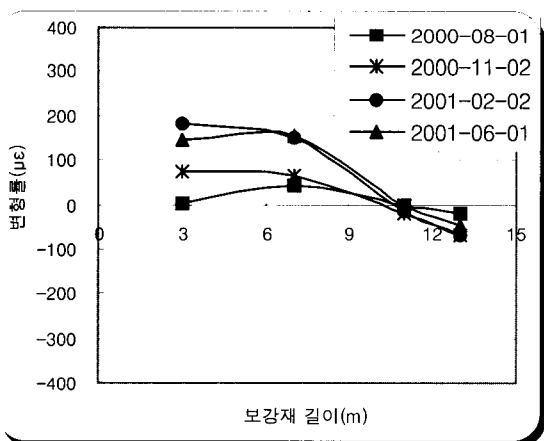


그림 25. A Soil Nail 변형

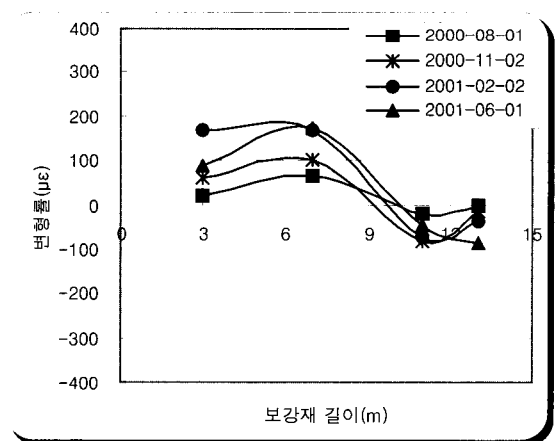


그림 26. B Soil Nail 변형

6. 보강재의 거동

6.1 연화재사면의 Soil Nail

그림 25~28은 연화재사면 2소단에 설치된 soil nail

의 깊이별 변형율을 나타낸 것이다. 그림 25~28에서 보듯이 7~8m 지점에서 높은 변형율을 보이며, 시간에 따라 nail의 변형이 조금씩 증가하고 있다. 3m 지점에서는 2001년 2월 계측치보다 2001년 6월 계측치가 모두 떨어진 것을 볼 수 있다. 이는 수직 수평 절리가 우세하

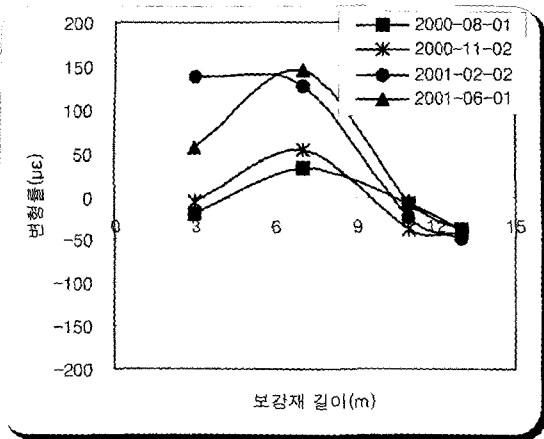


그림 27. D Soil Nail 변형

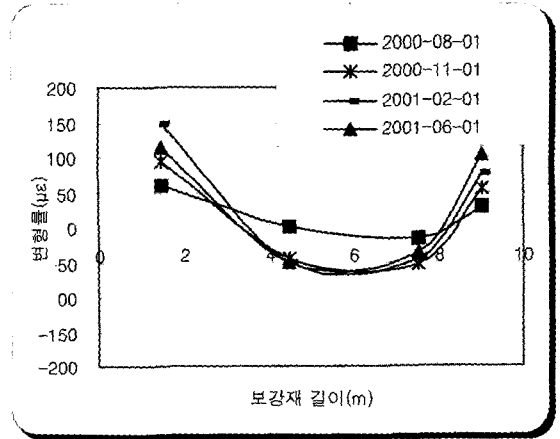


그림 30. 신동재사면 B Rock Bolt 변형

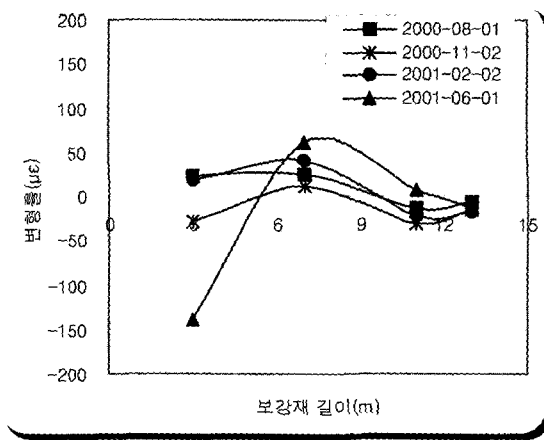


그림 28. E Soil Nail 변형

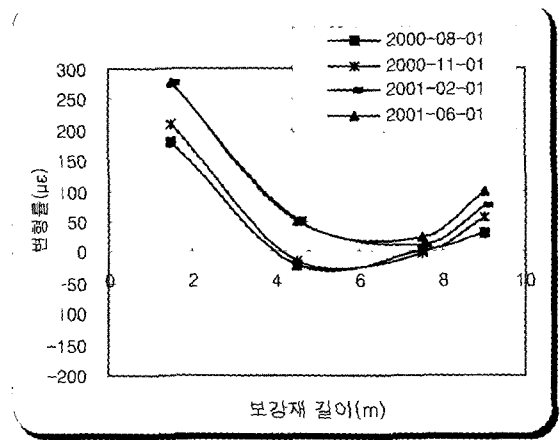


그림 31. 신동재사면 C Rock Bolt 변형

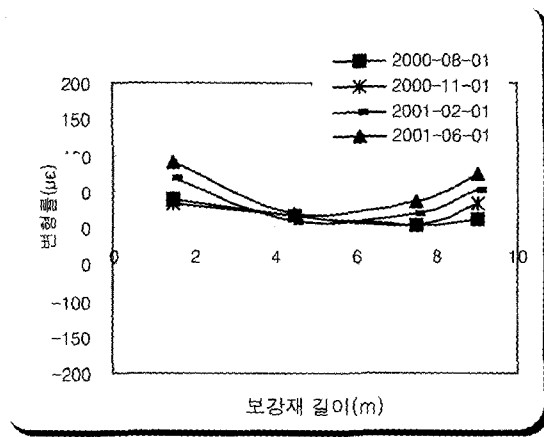


그림 29. 신동재사면 A Rock Bolt 변형

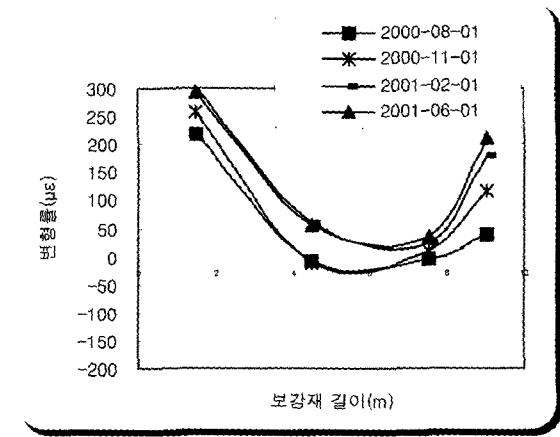


그림 32. 신동재사면 D Rock Bolt 변형

게 발달된 사암, 셰일의 표면 노출 후 극심한 풍화로 지표면 부근에서의 풍화의 영향으로 사료된다.

6.2 신동재사면의 Rock Bolt

불투수층의 대표적인 암반인 셰일이 집중적으로 분포

된 신동재사면 경우에는 우기시 표토수가 지하깊이 침투하지 못하고 셰일층의 절리면을 따라 지표에 가까운 부분에서 흐르고 있다. 이는 강우 후 셰일층 주위의 숏크리트 표면이 습윤 상태로 지속적으로 유지하고 있기 때문이다. 본 사면의 기 시공된 rock bolt 머리부분은 $\sigma_{ok} = 210 \text{ kg/cm}^2$ 의 강도를 가진 shotcrete에 재하판이 고정되

어있다. 그림 29~32에서 보이는 것 같이 1.5m에서 가장 큰 변형율을 보이고 있는데 이는 지표수가 암반과 shotcrete의 경계면을 흐름으로서 큰 암괴내 간극 수압 증가 및 절리면내 압력 증가에 기인한 것으로 사료된다.

또한 9m 지점에서 점차적으로 변형율의 증가를 볼 수 있는데, 이를 사면의 가상활동 파괴면이라 보기엔 긴 시간의 경과 후 판단해야 할 것이다.

7. 결 론

연구 대상사면에 설치된 V/W 계측기와 FBG sensors의 계측치를 바탕으로 다음과 같은 결론을 유추할 수 있었다.

- (1) 상용 계측기의 계측결과와 FBG sensor의 계측결과가 거의 일치함을 알 수 있으며, FBG sensor를 이용한 실시간 계측결과가 토목구조물의 안정성 평가에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.
- (2) 사면의 파괴면 예측에 중요한 요소인 항온심도를 결정하는 요인은 지반 고유의 열전도도와 지하수의 유무가 중요한 인자임을 알 수 있다.
- (3) 김해사면에서 항온심도와 가상활동 파괴면이 거의 일치함을 볼 수 있다. 그러므로, 지중온도의 측정으

로 사면의 파괴면을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

- (4) 지하수가 지반에 존재한다면 지중의 온도 변화폭이 작음을 알 수 있다. 이는 지중온도의 측정으로 항온심도에서의 온도 변화폭이 미소할 경우, 사면안정의 중요한 요인으로 작용하는 지하수의 유무를 판단할 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 지중온도 측정방법에 어려움이 많으나, 실내시험과 현장 계측 데이터를 통해 검증된 FBG센서를 이용한 지중온도 측정은 이러한 어려움을 수월하게 해결할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구지원에 의해 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 장기태, 권병근, 이선경, 남궁환, 유병선, 김경태(2001), 네일로 보강된 구조물에서의 변이영역과 변형률 분포, 한국지반공학회 사면안정기술위원회 학술발표회, pp.233-248.
2. 권병근(2000), 대절토 사면안정을 위한 Nailing 공법과 현장계측 분석에 관한 연구, 석사학위논문, 금오공과대학교, pp.42-55.
3. 홍성진(2001), 활동영역에서의 지중온도와 변형율과의 상관관계에 관한 연구, 석사학위논문, 금오공과대학교, pp.18-39.

(접수일자 2003. 11. 21, 심사완료일 2003. 12. 19)