

## 지중의 온도변화가 콘 선단저항력에 미치는 영향

### Effect of the Temperature Change on the Cone Tip Resistance

김래현<sup>1)</sup>, Raehyun Kim, 이우진<sup>2)</sup>, Woojin Lee, 윤형구<sup>1)</sup>, Hyung-Koo Yoon, 이종섭<sup>2)</sup>, Jong-Sub Lee

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**SYNOPSIS** : The criteria such as ASTM recommends that the zero reading process of CPT must be performed in the same temperature condition with underground in order to reduce the effect of temperature. However, this method can not consider the change of temperature occurred during penetration. In this study, ultra small size temperature sensor with 0.5mm in diameter is manufactured to estimate and compensate the effect of temperature by using FBG sensor. The continuous temperature changes are monitored during cone penetration by using FBG temperature sensor installed in cone penetrometer. The temperature compensated tip resistances show the uniform and similar distributions with depth in different with originally measured tip resistance in cohesive soil. This study verifies that the tip resistances measured by previous zero reading method are affected by the change of underground temperature, and suggests the new temperature compensation technique using by FBG temperature sensor.

**Keywords** : 마이크로콘, 온도보상, 초기값 설정, 콘관입시험, FBG 센서

## 1. 서론

콘 관입시험에 앞서 초기값 설정(zero reading)을 설정하게 된다. 일반적으로 직사광선을 받지 않는 상태의 공기 중이나 콘의 선단부를 지표에 일부 관입한 상태에서 실시한다. 혹한기나 혹서기에는 지중의 온도와 동일한 온도로 맞춰진 물 양동이에 담겨 초기값을 설정한 뒤 관입시험을 실시한다(ASTM D5778-95 2000). 이러한 과정은 콘 관입시험기 주변에서 발생하는 온도의 영향을 최소화하기 위한 것으로 전기저항식 변형율계(strain gage)를 채택한 모든 형태의 기계적 장치는 온도의 영향에 노출되어 있기 때문이다(김래현 등 2008; 이종섭 등 2008).

Zuidberg (1988)는 건조한 사질토 지반의 경우에는 콘 관입시 콘과 흙입자 사이에서 발생하는 마찰열에 의해 콘 주변온도가 30℃ 이상 증가한다고 하였다. 또한 온도에 의한 영향은 콘의 크기와 상관없이 발생되며 여러 가지 크기의 콘에 대한 실내 및 현장시험 결과, 전기저항식 변형율계를 이용하는 콘 관입시험기는 온도의 영향을 받는 것으로 나타났다(Lunne 등 1986; 김래현 등 2009). 콘 시험에 있어 온도의 영향은 우리나라와 같이 여름과 겨울의 온도차이가 40℃ 이상 발생하는 지역에서 더욱 크게 나타나므로 콘 관입시험결과에 대한 온도의 영향을 고려할 필요가 있다. 또한 콘이 지중에 관입되는 동안 콘 주변온도는 흙과의 마찰열이나 지하수에 의해 초기값을 설정한 온도와는 달라진다. 즉, 공기 중에서 설정하는 기존의 초기값 설정 방법은 콘이 관입되는 동안 변화되는 온도조건을 반영할 수 없으므로 적절한 온도 보상법이라 할 수 없다. 본 연구에서는 광섬유 센서의 일종인 FBG 센서로 제작된 초소형 온도

센서를 콘 관입시험기 내부에 부착하여 콘이 관입되는 동안 콘 주변에서 발생하는 온도의 변화를 연속적으로 측정하고, 이를 이용하여 온도의 변화가 선단저항력에 미치는 영향을 실험을 통해 분석하였다.

## 2. 광섬유 온도센서

광섬유 센서(fiber optic sensor)는 머리카락 굵기(약  $250\mu\text{m}$ )의 작은 직경을 가지는 실리카로 구성된 센서이다. 전반사의 원리로 도파된 빛의 파장 변화를 측정하여 변위, 온도, 하중 등과 같은 외력의 크기를 측정하며, 빛이 도파되는 코어부(core)와 외부에서 유입되는 빛을 차단하는 클래딩층(cladding), 그리고 외부 충격으로부터 클래딩층을 보호하는 버퍼층(buffer)으로 구성되어 있다(Lee 등 2004). 센서의 크기가 매우 작으면서도 변형율계에 비해 민감도가 높고 침수, 부식 및 전자기파 등과 같은 외부 요인에 의한 영향이 거의 없다는 장점이 있다(Zhou 등 2003). 특히 브래그 격자(Bragg grating)를 가지고 있어 특정 영역의 파장만을 반사하도록 제작된 FBG 센서(fiber Bragg grating sensor)는 온도와 변위에 민감하게 반응하기 때문에 온도 센서로도 널리 사용되고 있다 (Kanellopoulos 등 1995). 또한 설치와 측정이 간단하고 한번에 다지점 측정(multiplexing)이 가능하기 때문에 최근 토목분야의 적용성이 점차 확대되고 있다.

본 연구에 사용된 FBG 온도센서는 그림 1과 같이 직경 0.5mm의 스텐리스 스틸(STS303) 튜브 내에 부착되어 온도의 증감에 의해서만 팽창과 수축이 발생하도록 제작되었다. 콘이 관입되는 동안 온도 변화가 발생하면 즉시 FBG 온도센서에서 파장변화가 나타나게 된다. 그림 2의 개요도에서 보는 바와 같이 콘 선단부에 부착된 FBG센서는 선단저항력에 의한 파장변화량과 온도에 의한 파장변화량이 함께 측정되나 콘 내부에 설치된 온도센서에서는 온도에 의한 파장 변화량만 측정된다. 즉, 콘이 관입되는 동안 선단에서 측정된 파장변화량에서 온도센서의 파장변화량을 차감함으로써 온도에 의한 선단저항력의 영향을 평가할 수 있다. FBG 온도센서는 100Hz(1초당 100회)까지 파장 변화를 측정할 수 있으므로 관입과 동시에 연속적인 온도 보상이 가능하다. FBG 온도센서를 이용한 마이크로콘의 이론적 온도보상 원리는 김래현 등(2008)에 자세히 설명되어 있다.

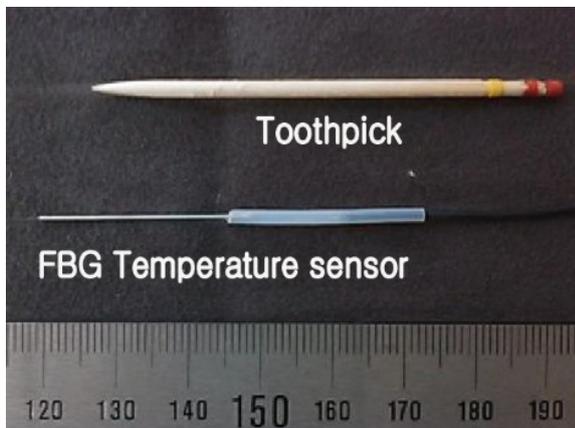


그림 1. 광섬유 온도센서(직경 0.5mm)

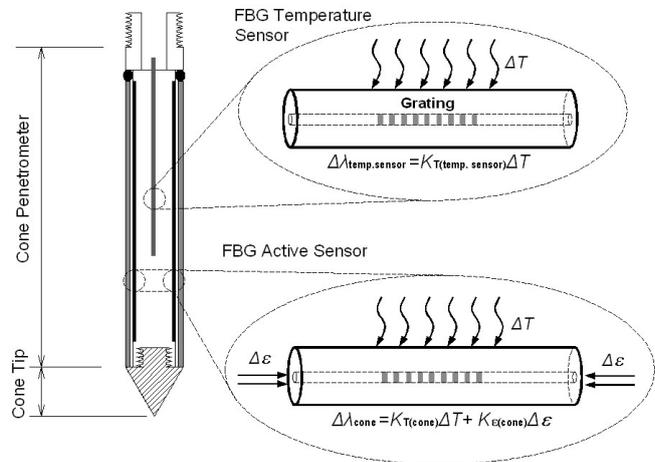


그림 2. 광섬유 센서를 이용한 온도보상 개요도

## 3. 실험방법

### 3.1 마이크로콘 제작

실내시험을 통해 온도 영향을 평가하고자 전기저항식 변형율계와 FBG 센서를 이용하여 초소형 마이크로콘을 제작하였다. 전기저항식 변형율계와 동일한 조건에서 측정된 시험결과를 이용하여 온도의 영향을 분석하기 위해 그림 3과 같이 직경 7mm의 마이크로콘 내부에 전기저항식 변형율계와 FBG 센서를

함께 설치하였다. 각 센서는 서로 마주보도록 대칭 위치에 2개씩 설치하였으며 관입시 변형율계의 전기 신호와 FBG센서의 파장변화량이 동시에 측정되도록 구성되어 있다. 온도에 의한 파장변화량을 측정할 FBG 온도센서(그림 1)는 외부 응력의 영향을 받지 없도록 콘 내부에 설치하였다.

전기저항식 변형율계는 측정길이(gauge length)가 1mm인 Kyowa사의 초소형 변형율계(KFG-1-120-1-111L1M2R)를 사용하였으며, 광섬유는 Technica SA사의 80%이상의 반사율을 가지는 1520~1590nm 파장대의 FBG센서를 이용하였다. 또한 전기저항식 변형율계는 그림 4와 같이 휘트스톤 브릿지(Wheatstone bridge, Half-bridge)를 이용하여 출력전압을 증폭하여 디지털멀티미터(Agilent, 34411A)로 측정하였다.

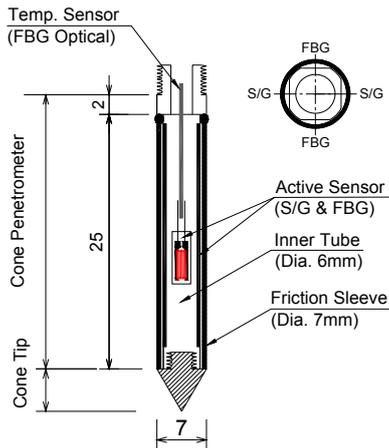


그림 3. 광섬유 마이크로콘

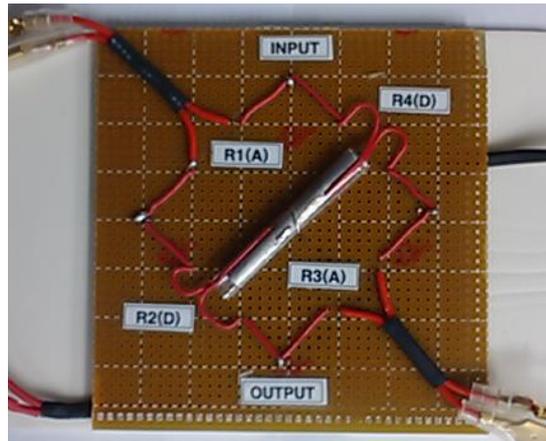


그림 4. 휘트스톤 브릿지(Wheatstone bridge)

### 3.2 온도센서 캘리브레이션

FBG 온도센서에 대한 캘리브레이션을 실시하여 측정된 파장변화량과 온도변화량의 관계식을 도출하였다. 항온 상태를 유지하기 위해 그림 5(a)에서 보는 바와 같은 아이스박스를 이용하였으며 예비시험 결과 10분 방치시 0.1°C 오차범위를 가지는 것으로 나타났다. 디지털 온도계를 사용하여 0.1°C 단위까지 정밀하게 온도를 측정하였고 일반 수은 온도계를 함께 설치하여 디지털 온도계의 오류 여부를 확인하였다. FBG 온도센서를 아이스박스에 넣고 주위를 밀봉시킨 후 수은을 섭씨 9°C에서 30°C까지 3°C 간격으로 변화시키면서 각 단계별로 5분간 FBG 온도센서의 파장을 측정하였다.

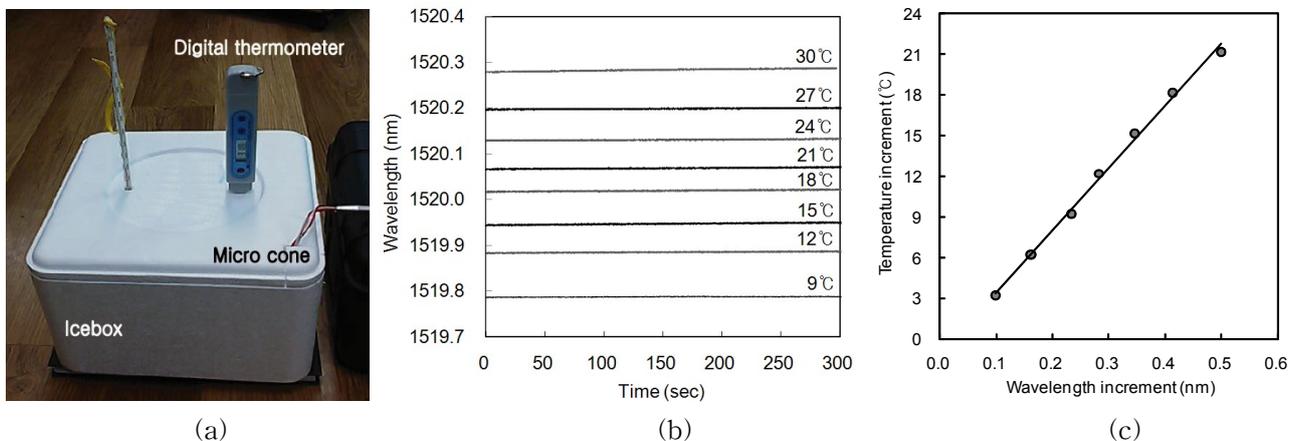


그림 5. 광섬유 온도센서 캘리브레이션: (a) 장치; (b) 온도별 측정파장; (c) 온도와 파장의 선형관계

그림 5(b)에서 보는 바와 같이 FBG센서로 만들어진 온도센서는 각 온도 조건에서 매우 안정된 파장 변화를 나타내었으며, 각 온도에 대한 파장변화량은 그림 5(c)와 같이 일정한 기울기를 가지는 선형으로 표현되었다. 파장과 온도에 대한 관계는 식(1)과 같고 여기서  $\Delta T$ 는 측정된 온도 변화량( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta\lambda$ 는 파장 변화량(nm)를 나타낸다.

$$\text{광섬유 온도센서: } \Delta T = 42.7(\Delta\lambda) \quad (1)$$

### 3.3 지반조성

온도에 의한 영향을 평가하기 위해 그림 6(a)와 같이 균질한 점토시료를 직경 1.2m, 높이 1.0m의 대형 챔버에서 조성하였다. 점토(kaolinite, GF-1250)와 모래(석영질 모래, K-7)를 질량비 1:1로 배합한 시료를 액성한계의 2배의 함수비로 잘 배합한 뒤 높이 2m의 슬러리 압밀장치에 재료분리가 일어나지 않도록 채운 후 60일 동안 연직하중 200kPa로 압밀시킨다. 1차 압밀이 90%이상 종료된 것으로 판단된 시점에서 관입시험기의 수직도 관리를 위해 점토시료 상부에 3cm 두께의 모래층을 포설하고 콘 관입시험을 실시하였다.

1mm/sec의 속도로 관입하면서 매 0.1mm마다 콘 선단저항력을 측정하였다. 섭씨 27 $^{\circ}\text{C}$ 인 시료 상단부에 콘 선단부를 관입한 상태로 10분간 방치한 뒤 초기값을 설정하였다. 광섬유 온도센서를 이용하여 측정한 점토 시료의 내부 온도는 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 콘이 관입되는 동안 점차 증가되어 약 2.89 $^{\circ}\text{C}$  변화하는 것으로 나타났다.

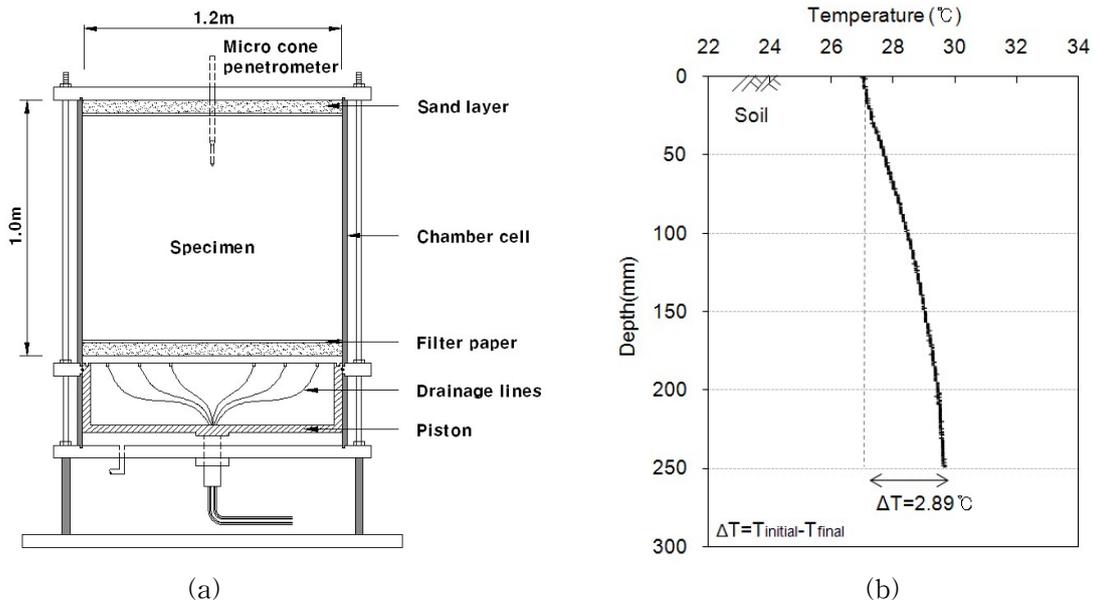


그림 6. 점토시료 조성: (a) 챔버 모식도; (b) 시료 내부의 온도변화

### 4. 실험결과

그림 7(a)는 점토시료의 콘 선단저항력 분포로써 전기저항식 변형율계(S/G)와 FBG센서에서 획득된 측정치를 함께 도시한 것이다. 전기저항식 변형율계에서 측정된 선단저항력은 침도가 깊어짐에 따라 일정하게 감소하는 것으로 나타났다. 반면, FBG센서는 선단부에서 측정한 파장변화량과 광섬유 온도센서에서 측정한 파장변화량을 서로 차감하여 온도의 영향을 보정한 값으로 약 400kPa의 크기로 침도에 따라 일정한 경향을 보이고 있다. 전기저항식 변형율계와 FBG센서가 함께 부착된 직경 7mm의 마이크로 콘을 이용하여 관입과 동시에 변형율계의 출력 전압과 FBG센서의 파장 변화량을 측정할 값이므로 이러한 측정값의 차이는 온도에 의해 변형율계가 영향을 받았음을 의미한다.

온도의 변화가 전기저항식 변형율계의 선단저항력에 미치는 영향을 평가하기 위해 콘 관입시험을 실

시한 직후 콘을 회수하여 빈 시험공에 재관입(re-penetration) 하였다. 빈 시험공에 콘을 재관입한 결과, 그림 7(b)에서 보듯이 선단저항력( $q_{c(re)}$ )이 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그림 7(c)는 재관입시험시 측정된 침도에 따른 FBG센서의 파장변화를 도시한 것이다. 광섬유 온도센서(그림 3)와 선단저항력 측정센서(active sensor-1, 2)의 파장변화량이 매우 유사한 형태와 크기로 측정되었으며 서로 차감하여 선단부에서 측정되는 응력을 평가한 결과, 파장의 변화량이 없는 것으로 나타났다. 즉, 재관입되는 동안 콘의 선단부에 작용하는 외부 요인은 온도 이외에 전혀 없음을 의미한다. 따라서 그림 7(b)에서 측정된 선단저항력의 변화량( $q_{c(re)}$ )은 온도에 의한 것임을 예측할 수 있다.

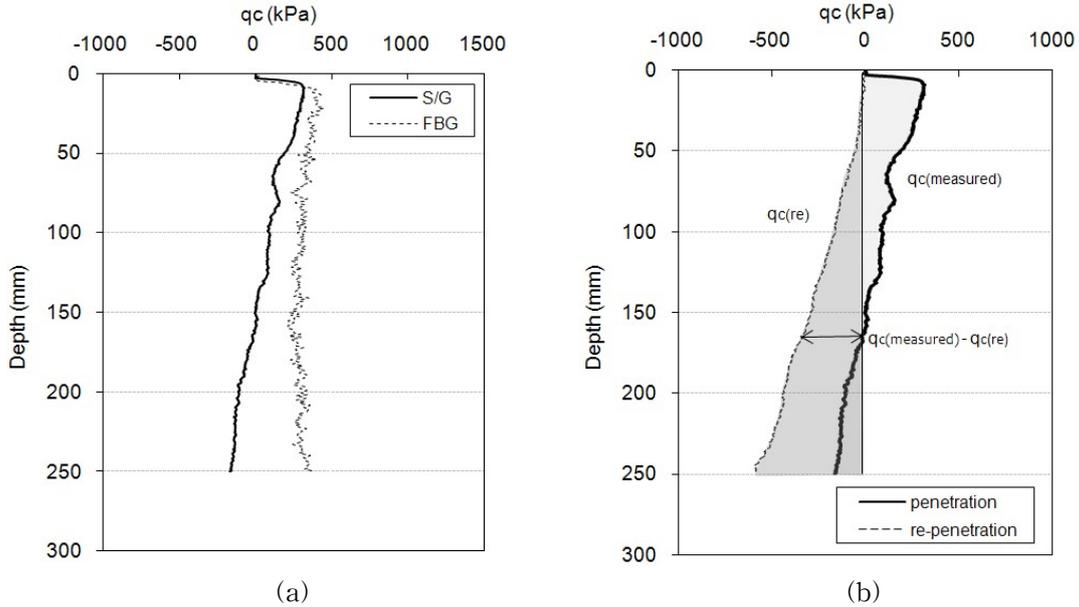


그림 7. 온도영향 실험결과: (a) 선단저항력 측정결과; (b) 재관입 시험으로 측정된 온도에 의한 선단 저항력 변화

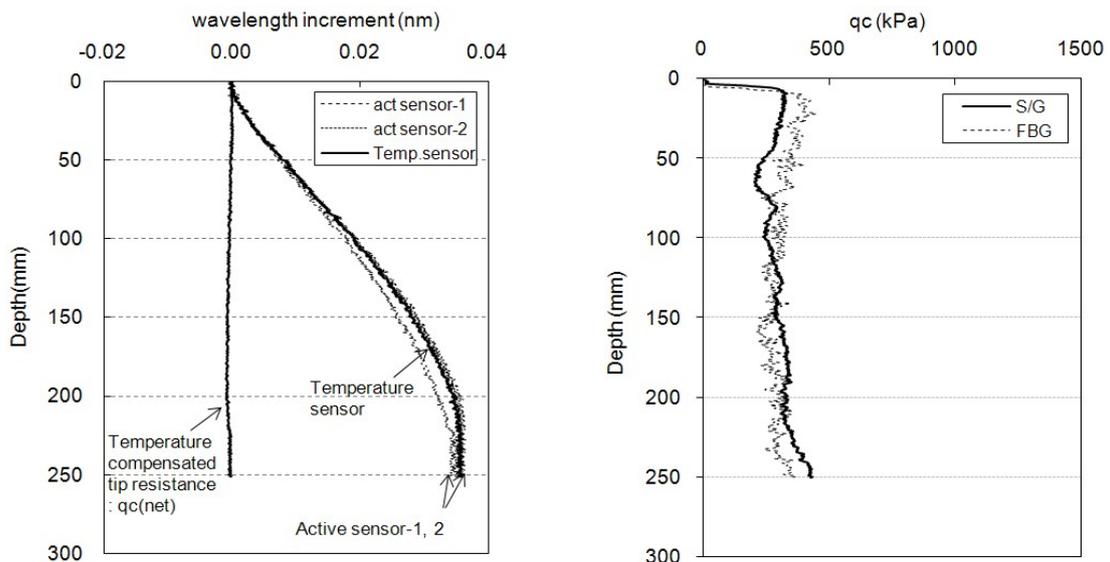


그림 7. (계속) 온도영향 실험결과: (c) 재관입시 FBG센서의 파장변화량; (d) 온도 보상후 선단저항력의 비교

재관입시험을 통해 측정된 온도에 의한 선단저항력( $q_{c(re)}$ )을 최초 관입시 측정된 선단저항력( $q_{c(measured)}$ )에서 차감함으로써 온도의 영향이 배제된 순수한 선단저항력( $q_{c(net)}$ )을 획득할 수 있었으며 그 결과는 그림 7(d)와 같다. 온도 보상된 전기저항식 변형율계의 선단저항력은 최초에 획득된 그림 7(a)와는 달리 심도에 따라 일정한 선단저항력(평균 380kPa)분포를 보이고 있다. 심도 100mm까지는 FBG센서의 선단저항력이 약 60kPa 가량 큰 것으로 나타났으며 이 후 심도에서는 두 센서의 선단저항력이 매우 비슷한 값을 보이고 있다. FBG센서는 관입과 동시에 연속적으로 온도 보상을 실시하였으나 변형율계는 재관입시험을 통해 온도 영향을 평가하였으므로 표층부 온도와 시료 내부의 온도가 달라졌기 때문에 표층부와 가까운 위치에서 오차가 발생한 것으로 판단된다. 전체적인 선단저항력 분포가 FBG센서에서 측정된 선단저항력 분포와 크게 유사한 것으로 나타나 간접적으로 평가한 변형율계의 온도영향은 적절하게 이루어졌음을 알 수 있다.

따라서 심도가 깊어짐에 따라 선단저항력이 감소하는 현상은 잘 못 측정된 값이 아니라 콘이 관입되는 동안 발생된 온도의 영향으로 측정된 선단저항력( $q_{c(measured)}$ )이 점차 감소하였기 때문이다. 이러한 현상은 지반이 연약하고 대기와 지중의 온도차가 클 경우 발생되며 온도 보상을 통해 해소될 수 있으므로 지중의 연속적인 온도변화를 반영한 온도 보상법을 적용하여야 한다.

## 6. 결론

본 연구에서는 온도에 민감한 FBG센서를 이용하여 관입과 동시에 온도의 영향을 보상 할 수 있는 초소형 광섬유 온도센서를 제작하였다. 이를 이용하여 콘 관입시험시 지중의 온도변화가 선단저항력에 미치는 영향을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전기저항식 변형율계를 이용한 기존의 콘 관입시험기는 매 시험 시작 전과 시험 후 초기값 설정(zero reading)을 실시하나 콘 관입시 발생하는 지중에서의 연속적인 온도변화를 고려할 수 없다.
2. FBG센서로 제작된 온도센서를 콘 관입시험기에 설치하여 지중의 온도변화를 측정하였으며, 그 결과 콘이 관입되는 동안 콘 주변의 온도는 지속적으로 변화되는 것으로 나타났다.
3. 간접적인 방법을 이용하여 온도의 변화가 선단저항력에 미치는 영향을 평가한 결과, 전기저항식 변형율계로 제작된 콘 관입기는 온도의 영향에 노출되어 있으며, 온도 보상 전후의 선단저항력 분포가 크게 다른 것으로 나타나 온도 보상이 필요한 것으로 평가되었다.
4. 연약한 점성토 지반은 원지반이 가지고 있는 선단저항력이 작아 온도의 변화에 민감하게 반응하며, 이를 해소하기 위해서는 지중의 온도변화를 연속적으로 보상할 수 있는 온도보상법을 적용하여야 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D01067).

## 참고문헌

1. 김래현, 윤형구, 이우진, 이종섭 (2008), "콘 관입시험기의 온도 보상에 대한 실험연구", 2008 대한토목학회 정기학술대회, pp. 958-961.
2. 김래현, 이우진, 윤형구, 이종섭 (2009), "광섬유를 이용한 온도 보상형 마이크로콘의 개발", 한국지반

공학회 논문집, (심사중)

3. 이종섭, 신동현, 윤형구, 이우진 (2008), "초소형 마이크로콘 관입시험기의 개발 및 적용", 한국지반공학회 논문집, 제24권, 2호, pp. 77-86.
4. ASTM Standard D5778-95. (2000), Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezo Penetration Testing of Soils, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Kanellopoulos, S. E., Handerek, V. A., and Rogers, A. J. (1995), "Simultaneous Strain and Temperature Sensing with Photogenerated In-fiber Gratings", *Optics Letters*, Vol.20, No.3, pp.333-335.
6. Lee, W., Lee, W. J., Lee, S. B., and Salgado, R. (2004), "Measurement of Pile Load Transfer Using the Fiber Bragg Grating Sensor System," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 6, pp.1222-1232.
7. Luune, T., Eidsmoen, T., Gillespie, D., and Howland, J. D. (1986), "Laboratory and field evaluation of cone penetrometers", *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Testes in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, pp. 714-729.
8. Zhou, Z., Thomas, W. G., Luke, H., and Ou, J. (2003), "Techniques of Advanced FBG Sensors: Fabrication, Demodulation, Encapsulation and Their Application in the Structural Health Monitoring of Bridges", *Pacific Science Review*, Vol.5, No.1, pp.116-121.
9. Zuidberg, H. M. (1988), "Piezocone Penetration Testing-Probe Development", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, Specialty Session No.13, Balkema Pub., Rotterdam.