

다층지반 탐지를 위한 광섬유 마이크로콘의 개발

Development of FBG Micro Cone Penetrometer for Layered Soil Detection

김래현¹⁾, Raehyun Kim, 이우진²⁾, Woojin Lee, 윤형구¹⁾, Hyung-Koo Yoon, 이종섭²⁾, Jong-Sub Lee

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

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

SYNOPSIS : Various types of micro cone penetrometers have been developed by using strain gages for the layered soil detection. Strain gages, however, are affected by several factors such as temperature, self heating and lead wire length. In this study, micro cone penetrometers with 3~7mm in diameter, are developed by using FBG sensor to overcome the defects of the strain gage, and compensate the effect of temperature during penetration. In order to verify the accuracy and reliability of the developed FBG cone, the cone penetration test is performed on the layered soil. The tip resistance of FBG sensor shows excellent sensitivity, and can detect the interface of the layered soils with higher resolution. In addition, the 3mm micro cone penetrometer which is impossible cone diameter by using strain gages presents much higher sensitivity than the 7mm cone penetrometer. This study suggests that FBG sensor is a useful sensor for manufacturing the ultra small sized cone, and effectively detects the interface of the layered soil.

Keywords : 광섬유 센서, 마이크로콘, 온도보상, 층상탐지, 콘관입시험

1. 서론

지반의 정확한 층상구조와 지반정수를 획득하기 위해 다양한 현장시험을 수행하게 된다. 그 중에서도 콘 관입시험은 일정한 속도로 콘을 지중에 관입시키면서 연속적으로 관입 저항치를 획득할 수 있어 국내외에서 널리 적용되고 있다. 비교적 지반교란이 적은 시험법이지만 연약지반 내에 협재된 샌드섬(sandseam)이나 다층지반의 경계면을 탐지하기 위해서는 관입에 따른 지반 교란을 최소화하여야 한다. 콘의 직경이 작을 수록 관입에 따른 교란도 감소가 되므로 최근에는 소형 콘의 개발이 활발해지고 있다. Tumay 등 (1998; 2001)은 직경 16mm의 소형 콘을 개발하였으며 현장시험을 통해 표준 콘(직경 35.7mm)과의 크기에 따른 관입저항치의 크기를 분석하였다. 이 후 DeJong 등(2003; 2007)과 Yafrate와 DeJong(2005)은 변단면을 가지는 직경 12.7mm의 소형 피에조콘을 제작하여 간극수압으로 층상경계면을 탐지하고자 하였다. Hird 등 (2003)은 직경 11.3mm와 25.3mm의 소형 피에조콘으로 콘의 크기에 따른 민감도 차이를 분석하였다. 콘의 직경이 작을수록 분해능이 높아 층상 경계면을 민감하게 탐지하였으며 선단저항력 보다는 간극수압을 이용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 간극수압계로는 직경 10mm 이하의 초소형 마이크로콘의 제작이 어려우며 건조한 사질토 지반에서는 적용성이 낮은 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하고자 Lee 등 (2008)은 선단저항력만으로 다층지반을 탐지하고자 직경 5mm의 마이크로콘을 제작하였다.

대부분의 소형 콘이나 마이크로콘에서 선단저항력과 주면마찰력을 측정하기 위해 전기저항식 변형율

계(strain gage)를 이용한다. 로드셀(load cell)이나 간극수압계도 형태와 측정원리가 다를 뿐 기본적으로 전기저항식 변형율계를 이용하여 외력을 측정한다. 그러나 전기저항식 변형율계는 주변 온도변화, 입력 전압에 의한 자체발열, 주변 전자기파 등에 의해 영향을 받으며 원거리 측정시 리드선이 길어짐으로 인한 저항변화로 측정값이 달라진다 (김래현 등 2008). 이종섭 등 (2008)이 실내시험을 통해 출력값에 영향을 미치지 않는 적정 온도(18~20℃)와 입력전압(2.0V)을 제시하였으나 이는 사용된 전기저항식 변형율계의 저항값에 따라 다르며 리드선의 길이 및 휘트스톤브릿지 회로구성 방식에 따라서도 달라질 수 있다. 즉, 콘 주변온도가 변할 경우 온도에 의한 영향을 고려할 수 없이 때문에 측정된 결과의 신뢰도를 크게 저하시킬 수 있다.

본 연구에서는 관입시 지반교란을 최소화 시켜 콘 선단저항력만으로 다층지반의 경계면을 명확히 탐지할 수 있는 초소형 마이크로콘을 광섬유 센서(fiber optic sensor)를 이용하여 개발하였다. 또한 콘이 관입되는 동안 변화되는 지중의 온도변화를 FBG(fiber Bragg grating) 온도센서를 이용하여 연속적으로 측정하여 온도에 의한 선단저항력의 영향을 보정하고자 하였다. 개발된 초소형 광섬유 콘을 이용한 실내시험을 통해 선단저항력만으로 다층지반의 경계면 탐지가 가능한지 평가하였다.

2. FBG 센서

외력에 의해 변화된 저항의 크기를 전압변화량으로 출력하는 전기저항식 변형율계와는 달리 광섬유 센서는 입사된 빛의 파장이 외력에 의해 변화된 정도를 측정하는 원리를 가진다. 광섬유는 실리카 유리로 구성된 직경 250 μ m의 머리카락 굵기의 센서이다. 빛의 굴절율 차이에 의한 전반사 원리를 이용하여 빛을 전파 시키기 때문에 그림 1에서 보는 바와 같이 센서의 중심 코어(core)부가 코어를 감싸고 있는 클래딩(cladding) 층보다 굴절율이 높다. 가장 바깥층인 버퍼(buffer)는 유리질로 구성된 코어와 클래딩 층을 보호하는 역할을 한다. 광섬유 센서의 기본 원리와 구성에 대한 설명은 Kersey 등 (1997)에 자세히 설명되어 있다.

FBG 센서는 광섬유 센서의 일종으로 그림 2와 같이 광섬유 코어에 특정파장을 반사시키는 격자(grating)를 가지고 있다. 격자 주변의 온도가 바뀌거나 인장 및 압축력이 가해지면 광섬유의 굴절율이나 길이가 변화되어 반사되는 빛의 파장이 변화하게 되며 이러한 반사파장을 브래그 파장(Bragg wavelength, λ_B)이라 한다 (Lee 등 2004). 전기저항식 변형율계에서는 출력전압을 측정하는 반면 FBG 센서는 브래그 파장의 변화를 측정하여 콘 주변의 관입저항력을 산출하게 된다. 즉, 기존의 변형율계처럼 변형율을 측정하고자 하는 위치에 센서를 부착한 뒤 외력에 의한 파장의 변화량을 인터로게이터(interrogator)를 이용하여 측정하고 이를 원하는 물리량으로 환산하면 된다.

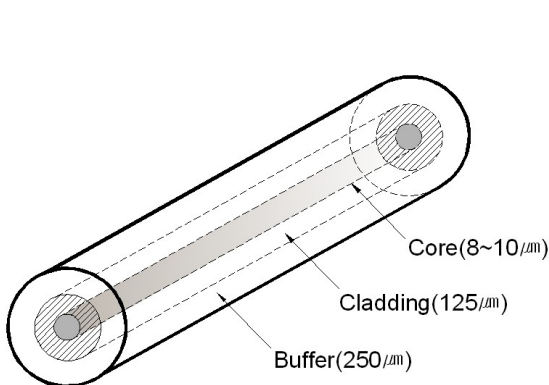


그림 1. 광섬유 센서의 구성

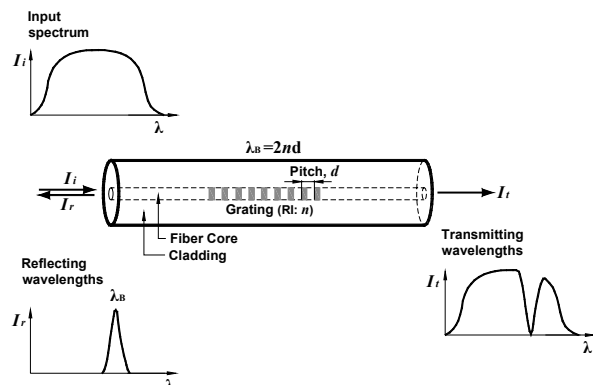


그림 2. FBG 센서의 측정원리

전기저항식 변형율계는 전압의 크기를 측정하기 때문에 측점이 먼 경우 신호의 강도가 저하되거나 출력전압의 크기가 변화될 수 있다. 그러나 광섬유는 빛의 진폭을 측정하는 것이 아니라 파장 변화량을 측정하므로 원거리 측정시에도 항상 일정한 값을 획득할 수 있는 장점이 있다. 또한, 전기저항식 변형율계와 달리 전자기파에 의한 영향이 없으며 전기적 신호를 이용하지 않기 때문에 방수나 부식에 대한 염려가 없다(Kerysey 등 1997, Zhou 등 2003). 휘트스톤브릿지(Wheatstone bridge)와 같은 전기신호 증폭 회로가 필요하지 않으며 여러가닥의 리드선 대신 머리카락과 비슷한 굵기(250 μ m)의 광섬유 케이블 하나만으로 측정이 가능하다. 하나의 광섬유 케이블에 여러 개의 FBG 측정센서를 배열할 수 있어 다지점 측정에 유리하며 변위, 온도, 인장, 압축 및 휨 등 서로 다른 물리량을 동시에 측정할 수도 있다 (Lau 등 2001). 특히 FBG 센서는 변형율 외에 온도에 대해서도 민감하게 반응하기 때문에 이를 이용하여 온도센서를 제작할 경우 0.1 $^{\circ}$ C정도의 미세한 온도변화까지 측정할 수 있다.

본 연구에서는 전기저항식 변형율계가 가지는 문제점을 극복하고 기존의 변형율계로는 제작할 수 없는 직경 3mm 이하의 마이크로콘을 제작하기 위해 FBG 센서를 이용하였다. 또한 콘이 관입되는 동안 변화되는 지중 온도를 측정하고 선단저항력에 대한 온도 영향을 보상하기 위한 온도센서 제작에도 FBG 센서를 활용하였다.

3. 마이크로콘 개발

3.1 콘관입시험기 구성

콘 관입시험기는 정확한 지반정수의 획득을 위해 선단저항력과 주변마찰력을 완전히 분리할 수 있어야 한다. Yun(2005)이 개발한 직경 5.6mm의 콘 장비는 선단저항력과 주변마찰력을 분리할 수 없는 구조를 가지고 있으며 Liu(2006)도 직경 1mm 내외의 가장 작은 크기의 콘을 제작하였으나 선단저항력과 주변마찰력 전체를 측정하는 방식을 취하고 있다. 이 후 이중섭 등(2008)이 선단저항력과 주변마찰력을 분리할 수 있는 이중관식 마찰슬리브 형태를 가지는 마이크로콘을 제작하였다. 그러나 이중섭 등(2008)이 개발한 마이크로콘은 콘 직경의 제약으로 Half-bridge 방식의 휘트스톤브릿지를 채택하고 있어 주변온도와 입력전압의 크기에 결과값이 영향을 받는 문제점이 있다.

본 연구에서 개발한 마이크로콘은 구조적으로 선단저항력과 주변마찰력을 분리하기 위해 그림 3과 같이 내부 튜브(inner tube)와 외부 튜브(outer tube)로 구분되는 이중관식 마찰슬리브 형태를 채택하였다. 전기저항식 변형율계 대신 FBG센서를 선단저항력 측정센서로 적용하였으며 FBG센서의 정확도와 신뢰성을 검증하기 위해 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 직경 7mm의 마이크로콘을 제작하였다.

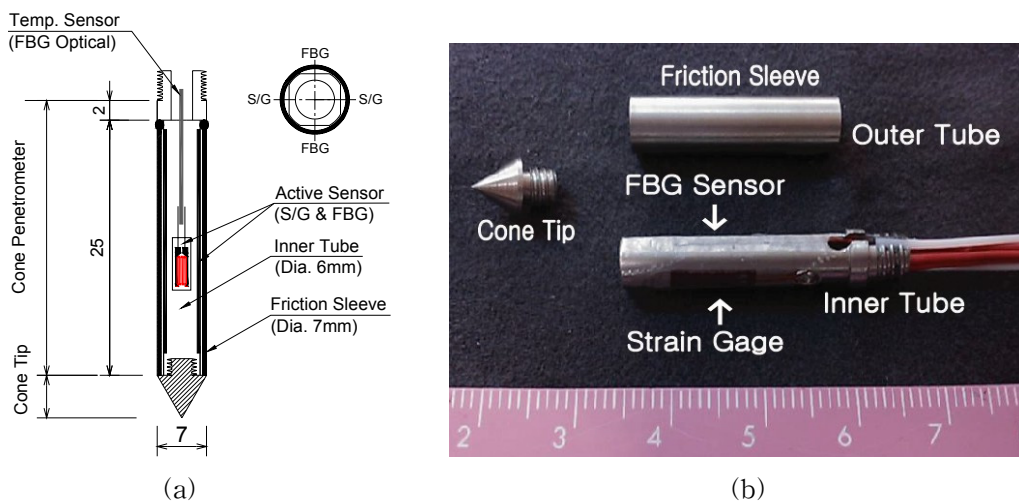


그림 3. 광섬유 마이크로콘(직경 7mm): (a) FBG센서와 전기저항식 변형율계가 함께 부착된 콘 개요도; (b) 사진(이중관식 슬리브 구조)

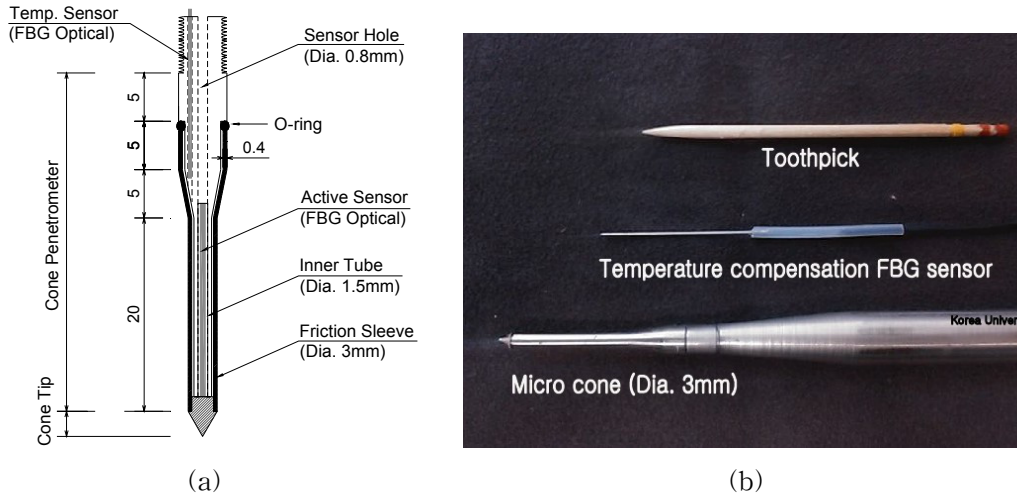


그림 4. 광섬유 마이크로콘(직경 3mm): (a) 콘 개요도; (b) 사진(광섬유 온도센서)

그림 3(b)와 같이 콘의 내부튜브 표면에 각각 1쌍의 전기저항식 변형율계와 FBG 센서를 90°방향으로 부착하여 하나의 콘에서 변형율계의 전기신호와 FBG센서의 파장변화량을 동시에 측정할 수 있도록 구성하였다. 즉, 콘이 지중에 관입될 때 발생하는 관입저항력을 전기저항식 변형율계와 FBG센서가 동시에 동일한 조건에서 측정하게 되며, 측정된 두 결과를 비교하여 FBG센서 측정값의 신뢰도를 평가할 수 있다. 게이지 길이가 1mm인 Kyowa사의 초소형 전기저항식 변형율계(KFG-1-120-1-111L1M2R)를 사용하였으며, 휘트스톤 브릿지를 이용하여 측정 전압을 증폭 시킨 후 Agilent사의 디지털 멀티미터(34411A)로 검침하였다. FBG센서는 Technica SA사의 1520~1590nm 파장대의 bare FBG를 사용하였으며 광대역 광원을 입사시키고 반사되는 파장의 변화를 측정하기 위해 Micron Optics사의 인테로게이터(SM130)를 이용하여 1초당 10개의 데이터를 측정하였다.

그림 4는 FBG센서만을 이용하여 제작된 직경 3mm의 초소형 광섬유 마이크로콘의 개요도와 사진이다. 선단저항력만으로 다층지반의 경계면을 명확하게 탐지하기 위한 목적으로 제작된 초소형 콘으로 직경 7mm 콘과 마찬가지로 이중관식 슬리브 구조를 가지고 있다. 그림 4(a)와 같이 내부 튜브 중심에 0.8mm의 구멍을 뚫고 직경 250 μ m의 bare FBG 센서를 설치하였다. 또한 콘 관입시 발생하는 지중의 온도변화를 측정하기 위해 그림 4(b)와 같이 직경 0.5mm의 광섬유 온도센서를 제작하여 콘 관입시험기 내부에 탑재하였다.

3.2 Calibration

개발된 콘의 적용시험에 앞서 하중에 대한 센서 출력값의 관계식을 캘리브레이션 과정을 통해 도출하였다. 편심없이 하중을 재하 할 수 있는 장치를 이용하여 직경 7mm 마이크로콘의 전기저항식 변형율계와 FBG센서를 각각 캘리브레이션 하였으며, 직경 3mm의 콘에 부착된 FBG센서도 동일한 방법으로 실시하였다. 전기저항식 변형율계는 섭씨 20°C, 입력전압 2.0V 조건에서 측정하여 안정적인 결과가 획득되도록 하였다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 직경 7mm 콘의 전기저항식 변형율계는 양호한 선형관계를 보이고 있다. 또한, FBG센서도 하중과 파장변화량 관계그래프(그림 5(b), (c))에서 뛰어난 선형관계식을 나타내고 있어 본 연구에서 개발한 초소형 광섬유 마이크로콘은 안정적인 일관된 반응을 보이는 것으로 분석되었다. 각 콘의 하중에 대한 관계식은 식(1)~(3)과 같다.

$$\text{변형율계(직경 7mm 콘): } P = 86,323(\Delta V) \tag{1}$$

$$\text{FBG 센서(직경 7mm 콘): } P = 221,296(\Delta \lambda) \tag{2}$$

$$\text{FBG 센서(직경 3mm 콘): } P = 22,121(\Delta \lambda) \tag{3}$$

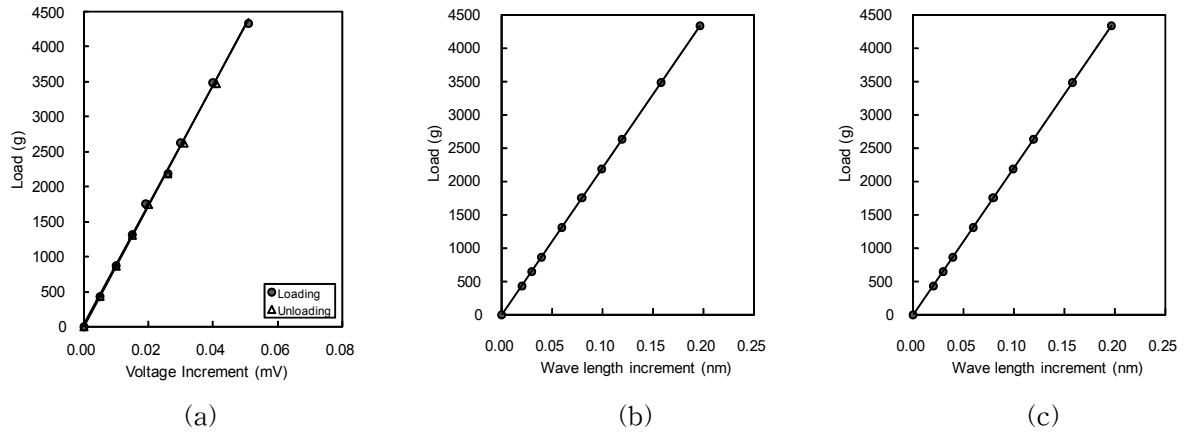


그림 5. 콘 캘리브레이션 결과: (a) 전기저항식 변형율계(직경 7mm 콘); (b) FBG센서(직경 7mm 콘); (c) FBG센서(직경 3mm 콘)

4. 콘 관입시험

본 연구에서 개발된 광섬유 마이크로콘의 신뢰성을 검증하기 위해 전기저항식 변형율계와 FBG센서가 함께 부착된 직경 7mm의 마이크로콘(그림 3)을 이용하여 모래지반에 콘 관입시험을 실시하였다. 그림 6(a)와 같은 직경 200mm, 높이 300mm의 원통형 투명 아크릴 셀에 K-7호사(석영질 모래, $D_{50}=0.17\text{mm}$)를 낙사법을 이용하여 균질하게 조성하였다. 직경 7mm의 마이크로콘을 1mm/sec의 속도로 관입하면서 매 0.1mm 관입시 마다 선단저항력을 측정하였다.

그림 6(b)에서 보는 바와 같이 전기저항식 변형율계(S/G)와 FBG센서에서 측정된 선단저항력은 깊이 70mm까지 선형 증가하다가 그 이후 심도에서는 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 두 센서에서 측정된 선단저항력의 분포가 매우 유사한 것으로 나타나 FBG센서로 제작된 광섬유 마이크로콘의 신뢰도는 높은 것으로 분석된다. 또한 콘이 관입되는 동안 콘 주변에서 발생하는 온도를 콘 내부에 탑재된 광섬유 온도센서로 측정한 결과, 그림 6(c)와 같은 온도 변화를 관찰할 수 있었다. 균질하게 조성된 시료의 내부 온도는 일정하게 유지되지 않고 지속적으로 변화하는 것으로 나타났으며, 지하수가 존재하거나 관입 심도가 깊어질 경우 마찰열의 발생 등으로 온도의 변화폭은 증가될 것으로 판단된다.

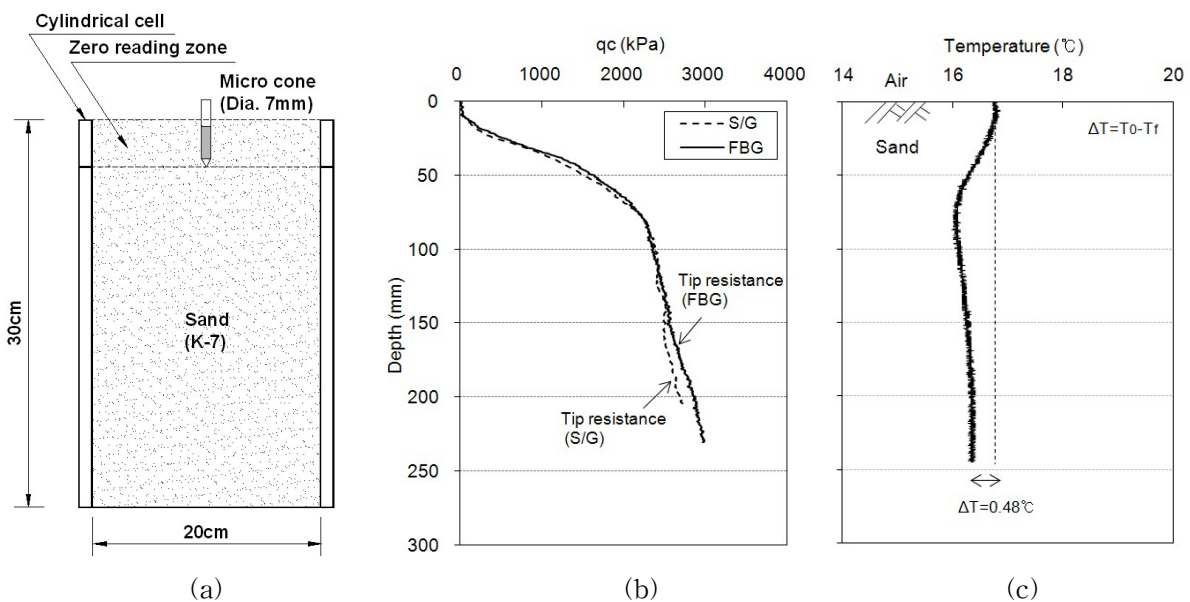


그림 6. 모래지반 콘관입시험결과: (a) 모래시료 조성; (b) 선단저항력 분포; (c) 시료내부 온도변화

5. 다층지반 탐지시험

개발된 콘의 정밀도와 민감도를 평가하기 위해 총 9개의 층으로 분리되는 직경 200mm, 높이 310mm의 원통형 셀을 이용하여 점토층 사이에 15mm 두께의 모래층이 협재되도록 그림 6(a)와 같은 다층지반을 조성하였다. 점토층은 액성한계 67.2%, 소성지수 36.4%를 가지는 분말상태의 카오리나이트(kaolinite)를 함수비 50%로 교반기를 이용하여 충분히 반죽하여 조성하였으며, 모래층은 앞서 설명한 K-7호사를 이용하여 형성하였다. 콘의 크기에 따른 민감도와 분해능을 비교하기 위해 직경 7mm 마이크로콘과 직경 3mm의 초소형 마이크로콘을 1mm/sec의 속도로 관입하였다. 이 때 전기저항식 변형율계에서 안정적인 데이터가 획득되도록 섭씨17℃, 입력전압 2.0V로 실험하였다.

그림 6(b)에서 보는 바와 같이 직경 7mm의 마이크로콘에서 측정된 전기저항식 변형율계와 FBG센서는 매우 유사한 선단저항력 분포를 나타내고 있다. 연약한 점토층 구간에서는 일정한 선단저항력 분포를 보이다가 협재된 모래층의 경계면에서 급하게 선단저항력이 증가하는 것으로 나타나 층의 경계면을 뚜렷하게 탐지함을 알 수 있다. Ahmadi와 Robertson(2005)이 유한차분해석을 통해 강도가 낮은 층에서 높은 층으로 변화될 때 교란영역이 적으며 비교적 정확한 층의 구분이 가능하다고 주장한 내용과 일치한다. 반면 모래층을 통과하여 다시 연약한 점토층의 경계면을 통과하는 구간에서는 모래층의 입자가 콘 관입시 함께 점성토층으로 밀려들어가 뒤섞이는 현상이 발생되어 상대적으로 층의 경계면이 명확하게 나타나지 않는 것으로 나타났다.

콘 크기에 따른 민감도를 평가하기 위해 동일한 시료에 직경 3mm의 초소형 마이크로콘을 관입한 결과, 그림 6(b)와 같이 직경 7mm 콘보다 훨씬 뛰어난 민감도와 해상도를 나타내었다. 콘의 직경이 작을수록 관입시 콘 선단부 주변에 발생하는 교란이 작기 때문에 초소형 마이크로콘을 이용할 경우 선단저항력만으로도 층의 경계면을 명확하게 탐지할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 콘의 직경이 커지게 되면 관입으로 인해 소성 영역이 넓어져 주변 지반의 전단변형에 더 넓은 면적이 관여되어 평균화되기 때문에 해상도가 감소하게 된다는 Hird 등(2003)의 연구 결과와 일치한다.

그림 6(c)는 광섬유 온도센서를 이용하여 콘이 관입되는 동안 지중에서 변화되는 콘 주변의 온도변화를 연속적으로 도시한 것이다. 심도가 깊어질수록 지중의 온도는 공기중보다 약간 높은 것으로 나타났으며 심도 250mm부터는 일정하게 수렴되어 지표의 온도와 약 0.42℃의 온도차이를 보였다.

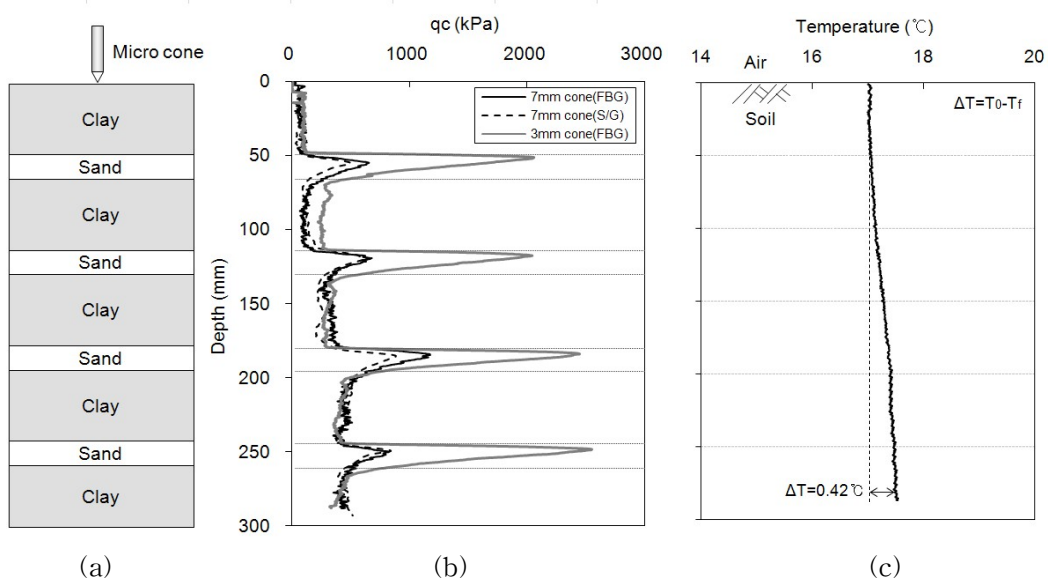


그림 6. 다층지반 탐지시험결과: (a) 다층지반 조성; (b) 선단저항력 분포; (c) 시료내부 온도변화

6. 결론

본 연구에서는 전기저항식 변형율계의 문제점을 극복하고 선단저항력만으로 다층지반을 탐지하기 위해 직경 3mm의 초소형 마이크로콘을 광섬유 센서를 이용하여 개발하였다. 개발된 콘의 적용성 검증을 위해 모래지반과 다층지반에 대한 관입시험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광섬유 센서의 일종인 FBG센서를 이용하여 기존의 전기저항식 변형율계로는 제작이 어려운 직경 3mm의 초소형 마이크로콘을 개발하였다. 데이터의 정확도를 높이기 위해 선단저항력과 주변마찰력을 분리할 수 있는 이중관식 마찰슬리브 구조를 적용하였으며 콘 내부에 온도센서를 탑재하여 관입시 지중의 온도변화를 측정할 수 있도록 제작하였다.
2. 전기저항식 변형율계와 FBG센서가 함께 부착된 직경 7mm의 마이크로콘을 이용하여 개발된 콘의 신뢰도를 검증하였으며 모래지반에서 두 센서는 매우 유사한 선단저항력 분포를 보여 FBG센서에서 측정된 데이터의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
3. 점토층과 모래층이 혼재된 다층지반에 관입시험을 실시한 결과, 두 센서 모두 다층지반의 층상구조를 명확하게 탐지하는 것으로 나타났다. 특히, 점성토층에서 험재된 모래층으로 전환되는 경계면에서는 선단저항력이 급격하게 증가되는 것으로 나타나 선단저항력만으로도 다층지반의 탐지가 가능한 것으로 분석되었다.
4. 동일한 시료에 크기가 다른 마이크로콘을 관입한 결과, 직경 3mm 콘이 직경 7mm의 콘보다 뛰어난 민감도와 해상도를 나타내어 콘의 직경이 작을수록 선단저항력을 이용한 다층지반 탐지에 용이함을 확인할 수 있었다. 또한, 광섬유 온도센서를 이용하여 관입과 동시에 연속적으로 변화되는 지중의 온도 분포를 측정할 수 있었다.
5. FBG센서는 기존의 전기저항식 변형율계와는 달리 광원을 이용하기 때문에 온도, 전자기파, 방수, 부식 등의 영향이 없으며, 머리카락과 같은 작은 직경을 가지고 있어 초소형 마이크로콘 제작시 전기저항식 변형율계를 대체할 수 있는 적합한 센서임을 실내시험을 통해 검증하였다.

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. 이종섭, 신동현, 윤형구, 이우진(2008), “초소형 마이크로콘 관입시험기의 개발 및 적용”, **한국지반공학학회 논문집**, 제24권, 2호, pp.77-86.
3. Ahmadi, M. M. and Robertson, P. K.(2005), “Thin-layer Effects on the CPT qc Measurement,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.5, pp.1302-1317.
4. DeJong, J. T., DeGroot, D. J., Yafraate, N. J., and Jabubowski, J.(2003), “Detection of Soil Layering Using a Miniature Piezoprobe”, *Soil Rock America 2003*, Boston, MA, pp.151-156.
5. DeJong, J. T., Yafraate, N. J., and DeGroot, D. J.(2007), “Design of a Miniature Piezoprobe for

- High Resolution Stratigraphic Profiling”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.30, No.4, pp.1-11.
6. Hird, C. C., Johnson, P., and Sills, G. C.(2003), “Performance of Miniature Piezocones in Thinly Layered Soils,” *Geotechnique*, Vol.53, No.10, pp.885-900.
 7. Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M, Koo, K. P., Askins, C. G., Putnam, M. A., and Friebele, J.(1997), “Fiber Grating Sensors,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol.15, No.8, pp.1442-1463.
 8. Lau, K. T., Zhou, L. M., and Wu, J. S.(2001), “Investigation on Strengthening and Strain Sensing Techniques for Concrete Structures using FRP Composites and FBG Sensors”, *Material and Structures*, Vol.34, pp.42-50.
 9. 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.
 10. Lee, W., Shin, D. H., Yoon, H. K., and Lee, J. S.(2008), “Micro-Cone Penetrometer for More Concise Subsurface Layer Detection”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, (Accepted)
 11. Liu, Z., Shi, B., and Sheng, D.(2006), “A Micropenetrometer for Detecting Structural Strength Inside Soft Soils”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.29, No.6, pp.15-22.
 12. Tumay, M. T., Kurup, P. U., and Boggess, R. L.(1998), “A Continuous Intrusion Electronic Miniature Cone Penetration Test (CIMCPT) System for Site Characterization,” *Proc. of Int. Conf. on Site Characterization 98*, Atlanta, GA, Vol.2, pp.1183-1188.
 13. Tumay, M. T., Titi, H. H., Senneset, K., and Sandven, R.(2001), “Continuous Intrusion Miniature Piezocone Penetration Test in Quick Soil Deposit,” *Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng*, Istanbul, Vol.1, pp.523-526.
 14. Yafrate, N. J. and DeJong, J. T.(2005), “Detection Stratigraphic Interfaces and Thin Layering Using a Miniature Piezoprobe”, *GeoFrontier 2005*, ASCE, Austin, Texas, GSP138, pp.2103-2113.
 15. Yun, T. S.(2005), “Mechanical and Thermal Study of Hydrate Bearing Sediments,” Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
 16. 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.