광섬유 센서에 의한 말뚝 하중전이 측정
Measurement of Pile Load Transfer using Optical Fiber Sensors

오정호[1], Jeong-Ho Oh, 이원제[2], Won-Jae Lee, 이우진[3], Woo-Jin Lee

[1] 고려대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
[2] 고려대학교 대학원 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
[3] 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : It is essential to measure load transfer mechanism of pile to check the appropriateness of assumptions made for design purpose and to continuously monitor the behavior of pile foundation. Through many attempts to monitor the behavior of super-structure in civil engineering area using several optical fiber sensors have been made, application of optical fiber sensor technology on pile foundation has not been tried up to now.

Load transfer of model piles during compression loading was measured by optical fiber sensors and compared with the measurement by strain gauges. Fiber Bragg Grating(FBG) sensor system was used since it has many advantages, such as easy multiplexing, high sensitivity, and simple fabrication. Besides the model pile tests, uniaxial tension test of steel bar and compression tests of mortar specimen were carried out to evaluate the performance of FBG sensors in embedded environments.

The shift of returning wavelength due to the strain in FBG sensor is converted to the strain at sensor location and the dependence between them is 1.28 pm/μstrain. FBG sensors embedded in model pile showed a better survivability than strain gauges. Measured results of load transfer by both FBG sensors and strain gauges were similar, but FBG sensors showed a smoother trend than those by strain gauge. Based on the results of model pile test, it was concluded that the use of FBG sensor for strain measurement in pile has a great potential for the analysis of pile load transfer.

Key words : Strain Gauge, Fiber Optic Sensor, OTDR, Fiber Bragg Grating, multiplexing, load transfer, model pile, embedding, wavelength shift

1. 서론

말뚝기초, 교량, 터널 등과 같은 구조물의 합리적인 설계나 건설 후 지속적인 관리를 위해서는 이를 만족시킬 수 있는 계측 시스템을 구축하는 것이 필수적이다. 이를 위한 대안으로, 최근에 광섬유 센서가 토목공학 분야에 적용되어 각 구조물에 대한 장기적인 계측을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 현재까지는 교량이나 도로등 상부 구조물에 설치하여 스트레인 게이지와의 병행실험을 수행한 사례가 보고되어있다. 본 논문에서는 광섬유 센서중 다중점 측정이 가능하며, 장기적인 측정에 유리한 광섬유격자센서를 이용하여 모형말뚝의 하중전이 해석을 실시하였다.

2. 광섬유 센서

2.1 광섬유 센서의 종류와 기본원리

광섬유 센서는 전자기 간섭에 영향을 받지 않고 감도가 높으며, 소형, 경량이므로, 보통의 센서가 사용될 수 없는 위험한 장소나 고감도를 요하는 특수목적에 효과적으로 사용될 수 있다. 1984년 영국의 Southampton 대학의 D. N. Payne 그룹에서 처음으로 희토류 금속을 첨가한 광섬유가 개발된 이래, 특정파장에서 자유롭게 광증폭을 할 수 있으므로 광섬유 센서에서 신호대 잡음비가 높게 개선될 수 있었고, 여러 지점의 물리량을 동시에 측정할 수 있는 시분할, 파장분할 시스템의 연구에도 많은 진전이 이루어졌다. 특히, 1989년 G. Meltz 등에 의해 자외선 레이저를 광섬유 측면에 조사하여 광섬유의 특정 부위에 원하는 파장에 대해서 반사 특성을 보이는 브래그 격자가 개발된 이후 광섬유 센서의 연구가 괄목할만한 발전을 이루었다. 광섬유 센서는 크게 세기형 센서와 간섭형 센서로 구분되어진다. 일반적으로, 간섭형 센서가 정밀도가 뛰어나고 제조가 간편하므로 보편화되어 있는데, 간섭형 센서에는 Mach-Zender 간섭형 센서, Michelson 간섭형 센서, Extrinsic Fabry-Perot, Intrinsic Fabry-Perot 간섭형 센서, Fiber Bragg Grating(광섬유 격자 센서)가 있다.

2.2 광섬유 격자 센서(FBG 센서)

FBG 센서는 광섬유 센싱 분야에서 최근에 각광을 받으며 현재 상당한 연구가 진행중이다. 광케이블의 표면에 자외선광을 투과시켜 광섬유의 화학적 결합을 변화시킴으로써 굴절지수에 변화를 주어 생성되는 것이 FBG이다. 그림 1은 FBG의 원리를 도시한 것으로 케이블에 전달된 광신호의 스펙트럼, FBG를 통과한 광신호의 스펙트럼, 그리고 FBG에서 반사된 광신호의 스펙트럼을 보이고 있다. 반사신호의 스펙트럼에는 파장 λ_B에서 강한 반사가 발생하는 것으로 나타나며 파장 λ_B와 FBG의 격자간격은 다음 관계가 있다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

여기서 n은 광섬유의 유효굴절률이다. 따라서 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며, 광섬유 격자에 온도나 스트레인 등의 외부 물리량을 가할 경우 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다.

브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 미지의 물리량 (온도, 스트레인)을 다음 식 (2)를 통하여 역으로 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha+\xi)\Delta T+(1-p_e)\Delta\varepsilon] = K_T\Delta T + K_\varepsilon\Delta\varepsilon \tag{2}$$

여기에서

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right)[p_{12}-\nu(p_{11}+p_{12})] \tag{3}$$

이며, 식 (2)에서 α는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수이고 ξ는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수로서 실리카의 경우 α 는 0.510^{-6}, ξ는 8.310^{-6} 정도의 값을 가지므로, 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 또한 p_e는 광탄성 상수이고 p_{11}과 p_{12}는 스트레인 광학 텐서의 성분이며 n은 코어의 굴절률이다. 광섬유 격자의 온도 및 스트레인의 변화에 대한 브래그 파장의 변화는 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이며 단순화된 선형 계수 K_T와 K_ε만으로도 센서 특징을 표현할 수 있다. 광섬유 브래그 격자 센서는 측정량이 브래그 반사파

장의 변화량이기 때문에 측정이 간편하며, 광섬유 격자의 광 반사파장의 선폭이 좁기 때문에 분해능이 높은 센서를 구성할 수 있다. 또한 브래그 반사 파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않으므로, 하나의 광섬유를 이용한 다중점 측정이 가능하다.(그림 2) 광섬유 격자의 브래그 반사파장은 외부의 정, 자기장에 의해 영향을 받지 않으며, 광섬유 격자의 굴절률 변화는 1000℃ 정도까지 그 특성을 유지한다. 또한 센서 부분이 작고 광섬유의 특성상 잘 구부러지기 때문에 센싱 부분을 원하는 곳에 위치시키기 용이하다.

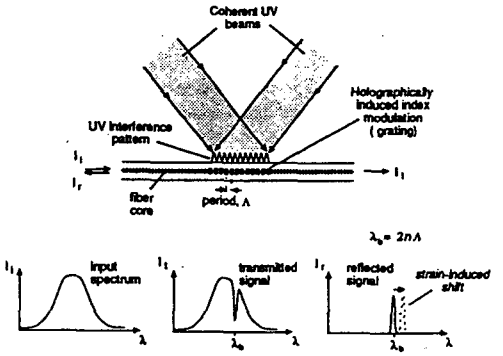


그림 1. FBG의 통과신호와 반사신호의 스펙트럼

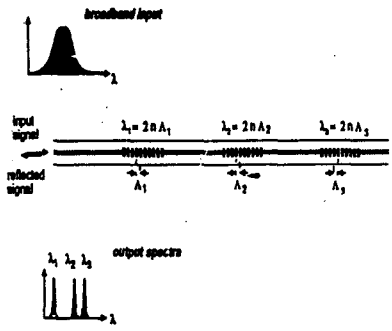


그림 2. FBG의 다중화 측정 원리

3. 실험방법 및 결과

3.1 철봉인장시험

철봉(길이 50cm, 지름 3cm) 양단면에 센서를 부착하기 위해서 한쪽면은 1cm 폭의 평면으로 제작하여 전기저항식 스트레인게이지를 부착하고, 다른면은 2mm정도의 홈을 내어 FBG sensor를 부착한다. FBG sensor의 부착과정은 FBG sensor를 홈을 따라 굽어지지 않도록 일렬로 위치시키고, 그 위로 코팅제를 사용하여 처리한다. 이때, 격자가 새겨진 부분은 파라핀으로 처리하여 외부 하중에 대한 거동을 용이하도록 처리하였고, 센서가 부착된 철봉은 UTM 시험기에 고정되고 반복하중을 가하여 각 하중에서의 스트레인 값을 측정한다. 이때, 스트레인 게이지는 UCAM을 통해 측정되고, FBG sensor는 광스펙트럼분석기(OSA)를 통해 각 하중마다의 파장의 변화를 얻게 된다.

FBG 센서로 측정된 파장의 변화를 스트레인으로 환산하기 위해서 파장의 변화와 게이지를 통해 얻은 스트레인 값에 대해 상관 관계를 알아보면 다음과 같다.

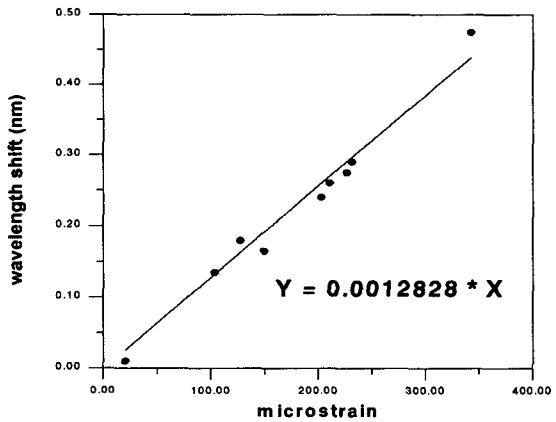


그림 3. 파장변화와 스트레인과의 관계

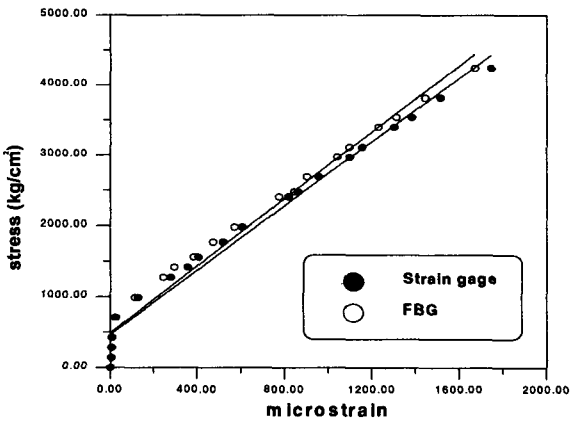


그림 4. FBG와 스트레인 게이지와의 선형성

그림 3에 의하면, 파장 변화와 스트레인(microstrain)과의 상관값은 1.28pm/μstrain을 보인다. 즉, 각 하중단계마다 이동되는 파장의 변화(nm)에 780을 곱하면 microstrain값으로 환산이 되는 것이다. 이 환산치로부터 계산된 FBG sensor의 스트레인 값은 선형성을 잘 보이고 있다. (그림 4)

3.2 모형 몰탈시편 압축시험

FBG 센서의 매설시 반응성을 관찰하기 위해서 몰탈공시체(15cm×15cm×20cm)를 제작하여 얇은 steel bar에 두 센서를 각각 부착하여 5cm의 간격을 두고 매설하여 7일간 양생 후에 UTM으로 압축시험을 시행하였다. UTM을 통한 재하 방법은 항복하중(35ton)을 미리 압축시험을 통해 측정한 후, 파괴하중 전까지 재하하고, 하중을 제거하여 두 센서 계측치의 상관성과 이력현상을 관찰하였다. 두 센서의 재하하중에 대한 반응은 다음과 같다.

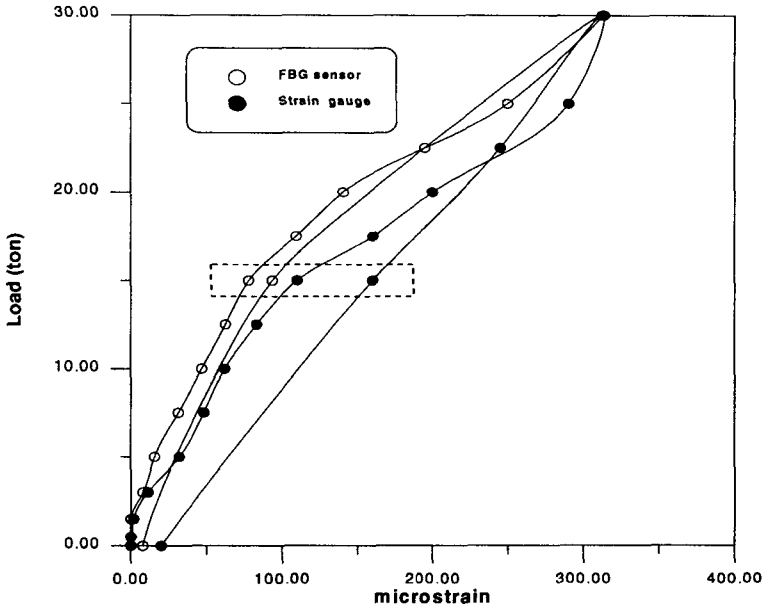


그림 5. 스트레인 비교치

위 그림을 보면, 두 센서 시스템의 스트레인 측정값이 차이를 보이나 전체적인 경향은 유사한 결과를 보이고 있다. 이러한 차이는 UTM을 통해 재하된 하중이 공시체 표면에 균등히 전달되지 않아 5cm정도의 간격을 둔 두 센서에 같은 하중이 가해지지 않았기 때문이다. 또한, 전체적으로 FBG sensor로 측정된 값이 게이지 값보다 작게 측정되었는데, 이는 FBG sensor를 부착시 코팅제로 쓰인 에폭시가 상대적으로 grating에 비해 stiff하여 FBG sensor의 거동을 구속한 것으로 판단된다. 본 실험에서 주목할 점은 위 그림에서 점선으로 표시된 부분에서 알 수 있듯이 unloading 상태에서 하중을 완전 제거시 미소 변형이 없어야 하나 스트레인 게이지에서는 상대적으로 큰 변형을 보이고 있으므로, FBG sensor가 보다 정확한 결과를 보여주고 있는 것으로 판단된다.

3.3 모형말뚝시험

본 실험에서는 모형말뚝(길이 40cm, 지름 4cm)을 제작하여 인발/압축재하시험을 통해 두 센서 시스템으로 하중전이 해석을 실시하여 FBG 센서의 새로운 계측 시스템으로의 가능성을 확인해 보았다. 모형말뚝을 제작하는 과정은 모형지반 조성, 지반 천공 및 몰탈 주입을 통해 이루어진다.

(1) 지반조성

모형말뚝을 타설하는 지반조건은 국내에서 가장 빈번하게 접하는 풍화토 지반을 재현하기 위해 모형토조(calibration chamber,그림 6) 안에 풍화토(포이동 지역)를 다져 넣은 높이 60cm, 직경 40cm의 플라스틱 통을 넣고, 토조와 통 사이에 낙사법(sand raining method)으로 균등한 밀도를 유지하여 모래를 채워 사용하였다. 조성된 모형지반은 토조 뚜껑을 덮은 상태로 수직압과 수평압을 각각 가압하여 24시간이 경과된 후 모형말뚝 설치를 위한 천공을 실시하였다.

(2) 모형말뚝의 제작

천공장비를 이용해서 직경 4cm, 깊이 40cm를 굴착한다. 이때, 공기압(1kg/㎠)으로 굴착으로 인한 선단부의 slime을 제거하고, 일정한 배합비로 만들어진 몰탈을 주입하게 된다. 이 과정에서 인발재하시험용 인장봉을 매설하게 되는데 양단면에 부착된 센서를 보호하기위해 얇은 벽을 가진 금속 파이프안에 인장봉을 넣고 몰탈을 주입하면서 파이프를 제거하여 설치한다.(그림 7) 모형말뚝 설치후, 7일간 양생 후에 재하시험을 실시하게 된다.

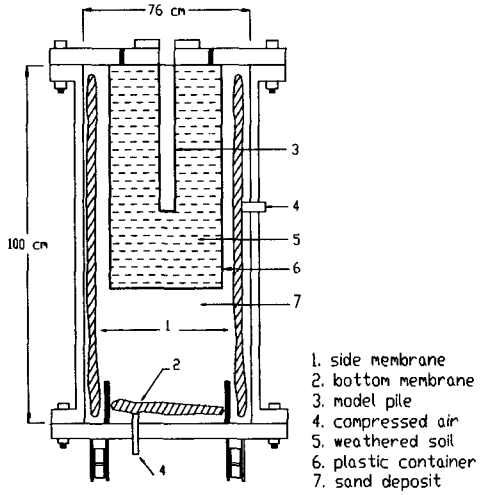


그림 6. 모형토조

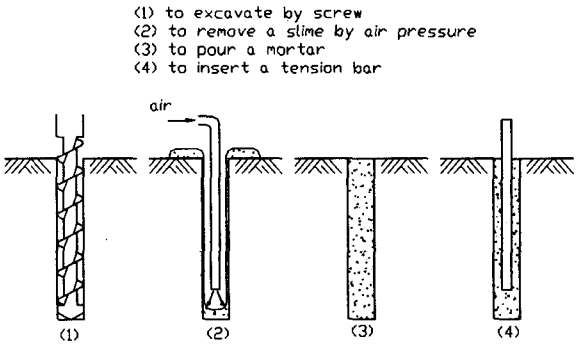
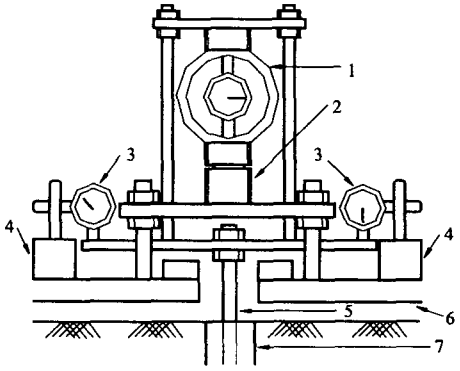


그림 7. 모형말뚝의 설치

(3) 재하시험

재하시험에 사용된 인발재하 시험장치는 그림 8과 같다. 하중재하는 5ton 용량의 유압 잭을 사용하였으며, 하중의 측정에는 허용하중 3ton의 proving ring이 사용되었다. 말뚝의 변위는 두 개의 다이얼 게이지 (감도 1/100mm)를 인발재하 시험 장치 끝단에 대칭으로 부착하여 측정하였다. 시험은 급속재하시험(quick maintained load test)법에 의해 실시되었으며 각 하중단계의 하중유지간격을 5분으로 하여 측정하였다. 인장재하시험인 경우에는 인장봉에 두 센서를 5, 15, 25, 35cm 깊이에 설치하여 측정하도록 하였고, 압축재하시험에서는 5, 20, 35cm 깊이에 각각 설치하였다. FBG sensor 부착시 모형몰탈 실험에서 사용한 코팅제보다 강성이 약한 재료를 이용하였다. 3본의 모형말뚝은 다음과 같은 조건(표1 참조)에서 제작되었다.



1. proving ring
2. oil jack
3. dial gage
4. magnetic holder
5. tension connection
6. chamber upper plate
7. model pile

그림 8. 재하시험 장치

표1. 재하시험 결과

Pile Type	수평압력(kg/㎠)	수직압력(kg/㎠)	횡방향토압계수	극한하중 (kg)
P1 (인장)	0.6	1.0	0.6	302
P2 (인장)	0.6	0.75	0.8	487
P3 (압축)	0.4	1.0	0.4	856

3.3 모형말뚝시험결과

세 본의 말뚝시험 결과를 말뚝 별 스트레인 비교치와 이로부터 산정된 하중전이곡선을 도시하면 다음과 같다.

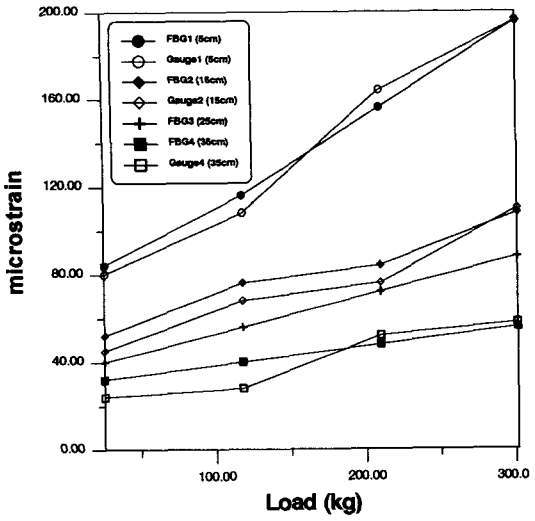


그림 9. PI 말뚝 스트레인 비교결과

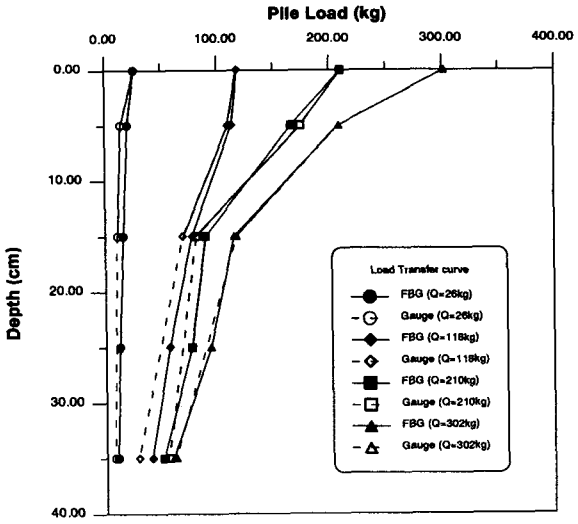


그림 10. P1 말뚝 하중전이곡선

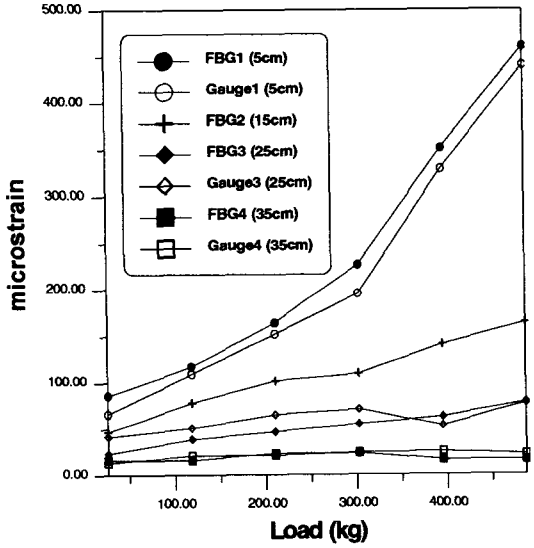


그림 11. P2 말뚝 스트레인 비교결과

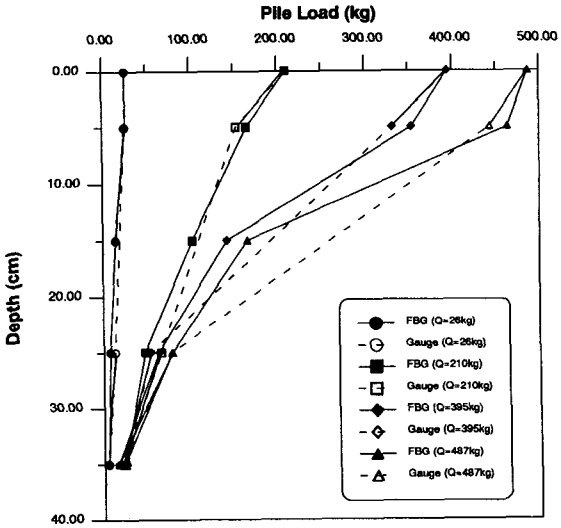


그림 12. P2 말뚝 하중전이곡선

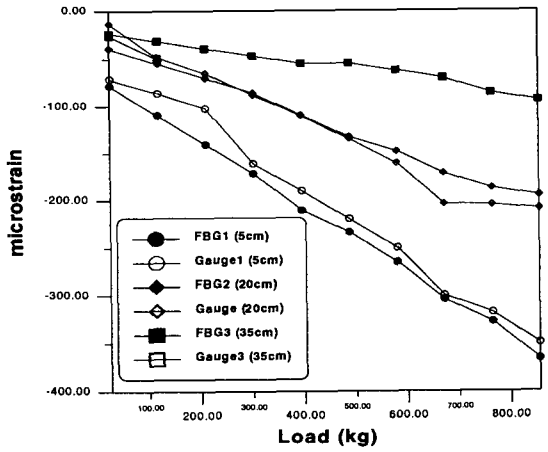


그림 13. P3 스트레인 비교 결과

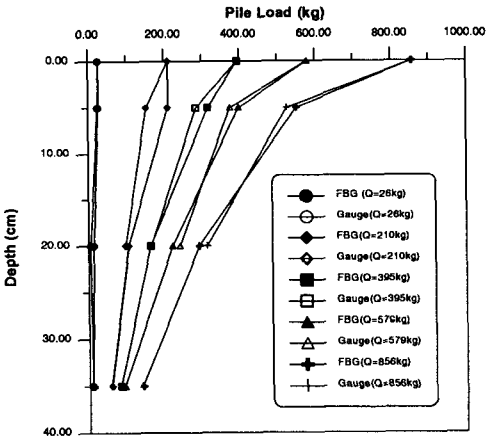


그림 14. P3 말뚝 하중전이 곡선

위 결과를 분석해보면, 측정된 하중은 약 2~10% 범위의 차이를 보이고 있는데, FBG인 경우에 하중재하 단계별 발생하는 스트레인 값이 비교적 일정하게 증가하는 경향을 보이는 반면, 스트레인 게이지에 의해 측정된 값은 부분적으로 일정하지 않은 분포를 보여주고 있다. 또한, 전체적으로 FBG에서의 스트레인 값이 스트레인 게이지 값보다 크게 측정되었는데, 이는 몰탈 압축시험에서 사용되었던 부착제보다 강성이 약한 재료를 사용함으로써 grating의 거동에 대한 구속을 제어하여 발생한 것으로 판단된다. 위 하중전이 곡선에서의 말뚝하중을 비교했을 때 비교적 잘 일치하고 있지만, P2의 하중전이 곡선에서 하중 395~487kg 단계에서 차이를 보이고 있는데, 이는 15cm에 매설된 스트레인 게이지가 작동하지 않아 5~25cm 사이를 직선분포로 가정하여 다소 과대산정이 된 것으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 본 논문에서 사용된 광섬유 격자센서(FBG)는 스트레인 게이지와 달리 한 line으로 여러 지점을 동시에 측정할 수 있는 다중화 측정이 용이하고, 계측의 정밀도가 뛰어난 센서이다.
(2) 모형 몰탈시편압축시험과 모형말뚝 하중전이 해석을 실시한 결과, 두 센서로부터의 계측치는 약간의 차이를 보였으나, 전체적으로 유사한 경향을 나타내었다. 특히. FBG 경우 매설하는 방법과 부착하는 정도가 센서의 측정에 상당한 영향을 미쳤다.
(3) 본 실험에서 두 센서가 매설되었을시 FBG의 생존력이 더 우수하였으며, 계측치 자체의 경향도 스트레인 게이지에 비해 일정하였다.
(4) FBG의 온도에 대한 문제와 실제 구조물에 매설하는 방법과 일체화된 센서 시스템이 구축된다면, 앞으로 상당한 장기계측용 센서로서의 유용성이 예상된다.

5. 참고문헌

1. Claus, R. O. and Murphy K. A(1993), "Optical fiber sensors for the quantitative measurement of strain in reinforced concrete structures", Experiments in Smart Materials and Structures, ASME, Vol. 181, pp.97~101
2. Dandridge A., J.H Cole, and G.H Siegel Jr.. (1984) Optical Fiber Sensors. Technical Digest-Symposium on Optical Fiber Measurements, pp.49~54.
3. Reinhart, L. J. and Morse, T. F.(1993), "Experimental results on embedded optical fiber sensors in concrete", Experiments in Smart Materials and Structures, ASME, Vol. 181, pp.53~60
4. Rao, K. S. S. and Venkatesh, K. H.(1985), "Uplift behavior of short piles in uniform sand", Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 25, No. 4, pp.1~7
5. Yoon, S. S.(1998), "An experimental study on the characteristics of bearing capacity of augercast pile installed using expansive mortar", Ms. D. Thesis, Korea Univ.
6. Oh, J. H.(1999), "Measurement of pile load transfer using Fiber Bragg Grating optical sensors", Ms. D. Thesis, Korea Univ.