

1. 서론

기존 전기저항식 센서의 경우 응답값의 노이즈, 수많은 리드선, 내구성 등 다양한 문제가 이슈화되고 있어 최근에는 국토해양부에서 최근 종료된 ‘시설물 안전관리 네트워크 구축사업’ 등을 포함한 다양한 연구사업에서 인프라 구조물 모니터링 시스템을 위하여 광섬유센서를 다수 적용하고 있다.

교량 모니터링 대상 요소 중 하나인 PS 강선이나 케이블에 대해, 특수교량의 건설 급증과 거더의 장대화로 인하여 강연선의 적용은 급증하고 있으나 아직까지도 강연선의 장력측정은 로드셀을 이용한 방법 또는 진동법에 의한 간접 추정법에 의존하고 있는 실정이다. 기존의 기법은 멀티 스트랜드의 전체적인 장력측

2. FBG 광섬유센서 기반의 Rebar 및 Strand meter 개발 현황

한국건설기술연구원(2007)에서 개발한 FRP-FBG 센서는 FRP Rebar를 인발성형에 의하여 제작하는 공정상에 FBG 센서를 같이 매립함으로써 FRP Rebar 자체에 센싱 기능을 부여한 방식이다(그림 1). 인발성형 후 광섬유센서의 데이터 측정을 위하여 FRP내에 삽입된 광케이블을 외부로 돌출시키기가 매우 어려운 단점이 있다.

[그림 2]의 전남대학교 연구팀(2008)에서 개발한 Smart tendon은 7연선의 가운데 부분인 킹와이어에 FBG 광섬유센서를 삽입하는 방식으로 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 강연선을 대상으로 개발된 기술이기에 현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 킹와

특집 1 ■ 2017 OFS-25 국내유치 기념

FBG 광섬유센서 기반의 rebar 및 strand meter 개발 현황

박기태*

정을 위한 방법으로 개별 강연선의 장력측정에는 현실적인 대안이 존재하고 있지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근들어 광섬유센서를 이용한 구조물 거동 측정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 아직까지 기존의 센서 시스템에 비하여 고가인 단점이 있으며, 전세계적으로 개발단계에 머물러 있는 실정이므로 수입대체 및 세계시장 선점을 위하여 관련 분야의 조속한 투자 및 연구개발이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

이어에 FBG 광섬유센서를 삽입하기 위해서는 수작업에 의존하거나 공장에서 생산시부터 고려가 되어야 하는 단점이 있다. 또한 공장에서 FBG 센서를 삽입하여 생산한다 하더라도 커넥터 연결 등을 위한 광케이블의 노출작업이 매우 번거롭기 때문에 실제 적용에는 아직까지 해결해야 할 과제가 많은 상태이다.

기존의 강연선을 이용한 교량구조용 케이블에 FBG 센서를 삽입하여 케이블을 설치한 이후에 측정을 위한 별다른 수고 없이 케이블의 장력을 측정하기 위한 연구도 이루어지고 있다. bare 상태의 광섬유 센서를 케이블 내에

* 한국건설기술연구원 SOC성능연구소

FBG 광섬유센서 기반의 rebar 및 strand meter 개발 현황



그림 1. FBG센서가 내장된 FRP Rebar

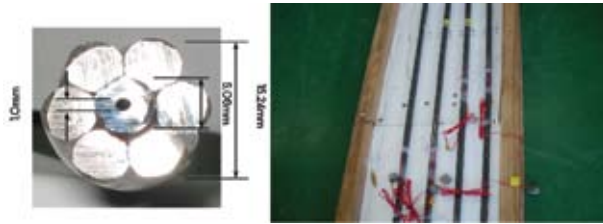


그림 2. Smart tendon

삽입하거나 FRP 내에 FBG 센서를 삽입한 재료를 활용하여 케이블에 센싱기능을 부여하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있고, 일부 교량에 실제 적용된 사례가 있다.

3. 신개념ORM(Optical rebar meter) 및 OSM(Optical strand meter) 제안

한국건설기술연구원에서는 2010년에 FBG센서를 이용하여 신형식 Rebar meter와 Strand meter를 제안하였다. 성능 확보 및 검증을 위하여 다양한 유형의 실험을 실시하였으며, 시작품 제작 및 성능검증 결과는 다음과 같다.

가. ORM 설계 및 시작품 제작

광섬유센서 적용을 위한 bare FBG의 적용은 작업시 고도의 숙련도를 필요로 하기 때문에 현장적용이 매우 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 ORM의 설계 및 시작품은 다음과 같은 목적을 달성하도록 구성하였다.

- 현장에서 철근에 탈부착이 용이한 구조로 설계.
- 콘크리트 내부에 센서가 매설되기 때문에 콘크리트 타설압 및 바이브레이터에 의한 다짐시에도 센서가 충분히 보호되는 구조이어야 하며, 광케이블이 노출되는 부위도 Armored patch cord에 의하여 충분히

보호되어야 함.

- 철근과 일체 거동이 가능하고 기타 구조체에 영향을 미치지 않도록 작은 크기로 제작하며 취급이 용이한 구조이어야 함.

상기와 같은 요구조건을 만족하도록 ORM시작품은 제작되었으며(그림 3) 참조), 설계 및 제작시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- ORM 내부는 철근 직경과 동일한 반경이고, 한 쪽면으로 끼우는 구조를 가지도록 하여 현장에서도 철근 뿐만 아니라 원형의 기타 건설부재에도 탈부착이 가능한 구조로 설계 및 제작하였음.
- 센서의 고정은 측면에 설치된 나사에 의하여 쉽게 고정이 되어, 기존의 전기식 센서처럼 철근 표면 그라인딩 작업 등이 불필요하여 원하는 위치에 현장에서 손쉽게 설치할 수 있는 장점이 있음.
- 광케이블 양단은 철심으로 둘러싸인 Armored patch cord로 보호 처리하여 콘크리트 타설압 및 바이브레이터에 의한 다짐시에도 충분한 내구성을 가지도록 설계 및 제작하였으며, 센싱부는 알루미늄(또는 강재) 패키징으로 구성되어 쉽게 손상되지 않도록 구성함(콘크리트 타설시 센싱부는 N1 등으로 방수 처리하는 것이 바람직).
- 센서의 크기는 53×18×14mm로 콘크리트 내부에 설치시 크기가 작아 기타 부재에 거의 영향을 미치지 않는 크기로 제작하였으며, 센서 패키징은 충분한 강성을 가지고 있어 충격, 진동 등에 영향을 받지 않도록 설계 및 제작함.

나. ORM 구조개선

기존의 ORM은 철근에 완전밀착 가능한 구조이나 스프링 구조 및 bare FBG의 일부가 노출되어 콘크리트 타



그림 3. ORM 설계 및 시작품 제작

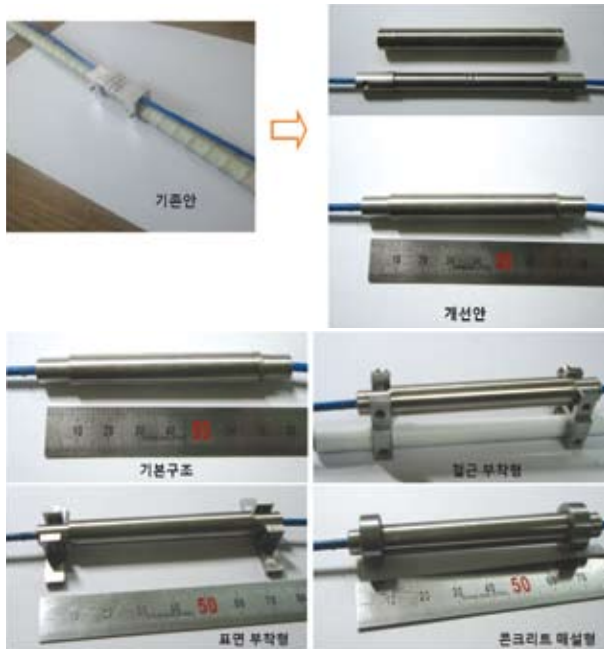
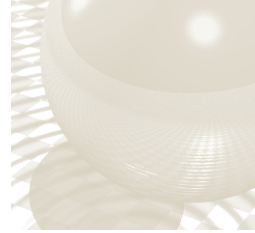


그림 4. ORM 유형

설압 등 외력에 약한 단점이 지적되었다. 이에 내부 스프링 구조와 bare FBG를 보호할 수 있도록 외부 보호관을 씌우는 방식으로 구조를 개선하였다.

개선된 ORM은 양단에 고정 설치되는 지그의 변형만으로 철근에 부착가능한 ORM 뿐만 아니라, 강재 또는 콘크리트 표면에 부착 가능한 표면부착형, 그리고 콘크리트 내부에 매설 가능한 구조로도 활용 확대가 가능하도록 개선하였다(그림 4).

다. Strand type OSM 설계 및 시작품 제작

효율적인 PS 강선 변형률 계측 시스템 개발을 위해 본 연구에서는 Strand type의 OSM을 설계 및 제작하였으며, 설계시 고려사항 및 특징점은 다음과 같다.

- FBG 센서를 강연선 외부에 부착하는 방식으로 구성하여 강연선의 전체길이, 센싱간격 및 센싱수가 변화한다 하더라도 유연성 있게 어떠한 요구사항이라도 즉각적인 대응이 가능하도록 구성함.
- 외부에 노출된 bare FBG 센서는 충격

및 압력에 의하여 쉽게 손상될 수 있기 때문에, Gel type의 물질로 1차 방수 및 충격완화 보호처리되고 외부에는 고무와 같은 2차 보호막을 구비한 Uni-tube로 처리함으로써 압력 및 충격과 기타 환경으로부터 센서 및 케이블을 보호하도록 구성함.

- 센서 양단은 Armored patch cord에 의하여 보호되도록 처리하여 그라우팅 및 기타 압력에 의해서도 쉽게 손상이 되지 않도록 설계 및 제작함.
- 인력에 의해서도 원하는 길이, 센싱간격, 센싱수 등의 즉각적인 대응이 가능하고 기타 손상에 대하여 충분한 내구성을 가지도록 시작품 제작.

라. Anchor head type OSM 설계 및 시작품 제작

종래의 도입된 긴장력은 일반적으로 로드셀을 이용하여 측정하였다. 고가의 로드셀을 적용하기에는 현장에서 한계가 있어 거의 도입되지 못하였으며, 중공 형식의 로드셀은 편심되어 Anchor head의 긴장시 측정오차가 매우 커지는 단점이 있었다. 이러한 종래의 단점을 극복하기 위하여 [그림 5]에서 보는 바와 같이 추가적인 별도의 로드셀과 같은 고가의 센서도입 없이, Anchor head 자체에 FBG 광섬유센서를 삽입하여 센싱이 되는 Anchor head를 제작하였다.

Anchor head의 설치만으로 추가적인 부속품의 설치 및 노력없이 도입된 긴장력 측정이 가능하다. 또한 기존의 로드셀은 전체 강연선 다발의 긴장력 총계만 측정이 가능한 반면 Anchor head식 OSM은 개별 썬치 인근에 FBG 광섬유센서를 설치함으로써 개별 강연선에 도입된 긴장력 측정을 경제적으로 수행할 수 있는 추가적인 장점이 있다.



그림 5. Anchor head 성능 검증

FBG 광섬유센서 기반의 rebar 및 strand meter 개발 현황

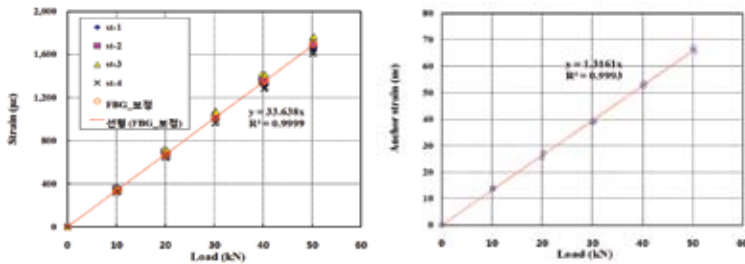


그림 6. Anchor head 성능 검증 결과

마. 실내 성능검증 실험

제작된 Anchor head type/Strand type OSM 시작폭의 역학적 특성 검증을 수행하기 위하여 4개의 전기저항식 변형률 측정값 평균과 FBG 측정값의 오차율을 비교한 결과 최대 약 1.3%의 오차율을 가지며 유사한 응답 경향과 선형적인 응답 특성을 나타내었다(그림 6).

따라서 Strand type OSM을 이용하여 원하는 위치의 강연선 긴장력 측정이 가능할 것으로 판단된다.

여기서 사용된 FBG 센서의 환산계수는 $1.4\text{pm}/\mu\epsilon$ 이며, 부착 센서의 위치 및 각도에 따라 미세한 환산계수의 차이가 발생할 수 있으므로 정밀한 긴장력 측정을 위해서는 FBG 광섬유센서의 측정 파장(Wavelength)을 긴장력으로 환산하는 환산계수의 일정한 관리도 향후 중요한 요소로 판단된다.

Anchor head type OSM의 경우(그림 6), 동일한 하중인 50kN시 Strand type의 OSM은 약 $1,700\mu\epsilon$ 정도이고, Anchor head type OSM은 약 $65\mu\epsilon$ 로, 전반적으로 선형적인 응답특성을 보이므로 상대적인 긴장력 측정시 센서로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 실험은 Anchor head의 단일 홀에 대해서만 실시한 것이다. 다수의 강연선에 긴장력 도입시 Anchor head의 응력분포는 상이할 것으로 예상되므로 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

바. OSM(Strand type/Anchor head type)의 현장적용 검증 연구

상기의 실내 검증결과를 바탕으로 Anchor head type 및 Strand type OSM을 제작하여 60m 실규모 PSC교량용 거더에 적용하였다. 정량적인 검증결과를 비교하기 위하여 중공형식의 FBG 로드셀을 자체적으로 제작하여 비교하였다(그림 7). Strand type OSM은 $2,000\mu\epsilon$ 까지는 측정이 가능하였으나, 이후에는 파단되어 더 이상의 응답측정이 불가능하였다. 이는 60m strand type OSM 제작시 격자와 격자 사이를 bare 광케이블로 처리하였기 때문에 PSC 멀티강연선 긴장시 강한 마찰력에 의하여 광케이블이 파단된 것으로 판단된다.

Anchor head type, Strand type 모두 로드셀과는 선형관계를 만족시키지 못했으나 상호간에는 강한 선형관계를 형성하여 센서로서의 성능을 갖추고 있음을 확인하였다. 로드셀과의 비선형관계에는 다양한 요소가 원인이 될 수 있으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

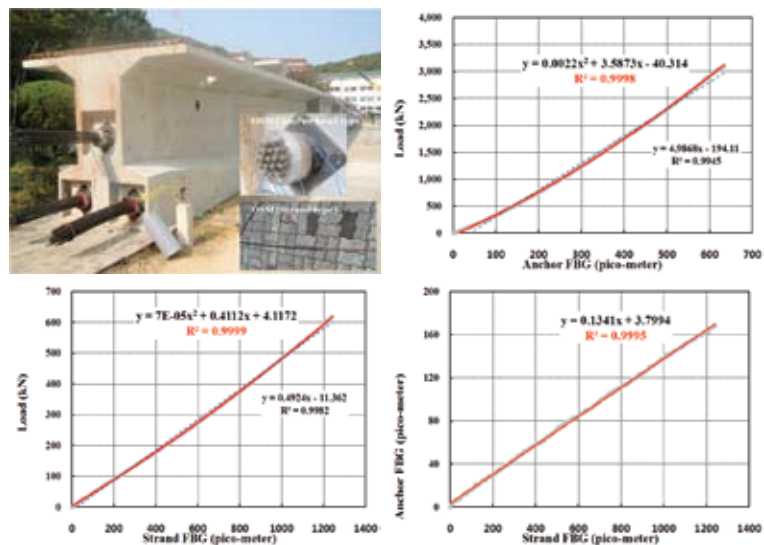
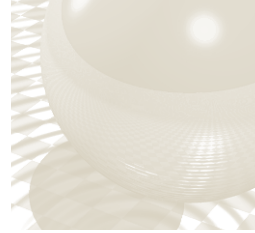


그림 7. 현장검증실험 광경 및 결과 데이터



4. 기대 효과

ORM 및 OSM을 비롯한 자가진단형 건설부재의 활용은 거의 모든 사회기반시설에 적용이 가능하며, 또한 적용 특성상 구조물 내부의 정량적인 값의 계측을 가능하게 한다. 이러한 구조물 내부의 실질적 물리량의 계측은 구조물의 실 상태를 평가하는 중요한 기초 자료로서 그 효용가치가 높다고 할 수 있다. 본 과제의 연구성과를 기반으로 한 스마트 센싱 분야 기술이 확산된다면 구조물 안전관리의 효율이 극대화되어 구조물의 안전관리 비용을 절감할 수 있으며, 상시 계측으로 인해 구조물에 발생할 수 있는 결함에 대해 신속히 조치할 수 있으므로 구조물의 노후화를 방지하여 구조물의 수명을 연장하는 효과를 기대할 수 있다.

본 과제에서 제시한 기술은 선진국에서도 아직 개발 초기 단계에 있으므로 이러한 자가진단형 건설재료의 개발은 기술력의 확보로 초기 국내 시장뿐만 아니라 세계 시장을 선점함으로써 국가경쟁력 상승의 한 부분으로 경제 산업적 기여도가 크다고 할 수 있다. 또한 첨단 IT 분야의 건설 융복합 기술의 노후우를 확보함으로써 향후 타산업과의 시너지 효과가 기대된다.

참고문헌

- [1] 한국건설기술연구원, 첨단 센싱 기술 기반 스마트 교량 구축 기술 개발, 최종보고서 (2010).
- [2] 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 최종 보고서 (2007).
- [3] 한국건설기술연구원, 광섬유센서를 이용한 교량안전진단 기술개발 연구보고서, 최종 보고서 (2002).
- [4] 김재민, 김현우, 김영상, 김진원, 윤정방. "광섬유센서가 내장된 강연선을 이용한 교량의 장력 모니터링 방법", 한국전산구조공학회 논문집, Vol.21 No. 3, pp. 287-294 (2008)

약 력

박기태



- 1994년 2월 - 현재
한국건설기술연구원 SOC성능연구소 연구위원
- 2000년 3월 - 2006년 2월
연세대학교 토목공학과, 공학박사
- 1992년 3월 - 1994년 2월
연세대학교 토목공학과, 공학석사
- 1988년 3월 - 1992년 2월
연세대학교 토목공학과, 공학사