

전기저항식 로드셀을 이용한 균등긴장시스템 개발 및 성능실험

박원태¹, 천경식^{2*}

¹공주대학교 건설환경공학부, ²포스코건설 R&D센터 인프라연구그룹

Development and Performance Experiment of Iso-tensioning System using Electrical Resistance Loadcell

Won-Tae Park¹, Kyoung-Sik Chun^{2*}

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

²Infra Research Group, R&D Center, POSCO Engineering & Construction

요약 MS(Multi-Strand) 케이블은 여러 개의 강연선으로 이루어져있어, 케이블 시공시 각 강연선을 차례대로 개별적으로 긴장한다. 그리고 마지막 강연선이 정착되었을 때, 모든 강연선에 동일한 장력이 도입되어야하며, 이것이 MS 균등긴장의 핵심기술이다. 본 연구에서는 엑스트라도즈(Extradosed)교 및 사장교의 사재케이블(Stay Cable)에 적용되는 2,200MPa 초고강도 강연선들을 균등하게 긴장, 제어할 수 있는 MS 케이블 균등긴장시스템을 개발하였다. 개발한 균등긴장시스템은 전기저항식 로드셀, 유압잭, 유압펌프 그리고 통합제어기로 구성되며, Master 강연선과 Slave 강연선의 장력변화를 실시간으로 예측하며 제어하는 알고리즘을 탑재하였다. 개발시스템의 기능과 성능을 검증하기 위해 균등긴장 실험을 수행한 후, 평양 태인2교(ED교)의 사재케이블 가설긴장에 성공적으로 적용하였다.

Abstract Because MS(Multi-Strand) cables consist of many strands, a jacking force is applied to each strand one by one for cable construction. All strands should have an equal tensile force when the last one is wedged. This is the core technology for MS iso-tensioning. In this study, a new MS cable iso-tensioning system was developed for controlling and jacking the high-strength strands, with an ultimate tensile strength of 2,200MPa, for a stay cable of extra-dosed/cable-stayed bridges. The newly developed iso-tensioning system consists of electrical resistance load cells, hydraulic jacking devices, hydraulic pumps, and integrated controllers. Moreover, it is embedded with an algorithm that can control and predict the variations in tensile forces of the Master and Slave strands in real time. Actual experiments were carried out to verify the function and performance of the newly developed system. This system was applied successfully to the stay cable construction of 2nd Tae-in extra-dosed bridge in Gwangyang.

Keywords : Cable-Stayed, Electrical Resistance, Extra-Dosed, Iso-Tensioning, MS(Multi-Strand) Cable

1. 서론

사장교의 케이블은 크게 PWS(Parallel Wire Strand) 형식과 MS(Multi-Strand) 형식을 나눌 수 있다. PWS의 경우 공장 제작이므로 품질관리가 용이하고 가설 속도가 빠른 장점이 있다. 그러나 가설 장비의 규모가 상대적으로 크기 때문에 부분 교체가 어려워 교체시공이 곤란하

다. 이에 비해 MS 케이블은 시공단계에서 발생할 수 있는 변수들에 즉각적으로 대응하여 시공이 가능하고, 큰 장경간 사장교의 케이블의 경우 대용량 긴장잭의 설치, 해체 등의 부가공정이 필요없으므로 긴장장비의 규모를 획기적으로 줄일 수 있다. 이러한 MS 케이블은 일괄 긴장이 아닌 일종의 현장 제작형 케이블로써 각 스트랜드별 삽입과 긴장을 반복하는 방식으로 가설한다. 따라서

*Corresponding Author : Kyoung-Sik Chun(POSCO Engineering & Construction)

Tel: +82-32-748-3138 email: chunkspe@poscoenc.com

Received October 23, 2015

Revised (1st December 7, 2015, 2nd December 22, 2015)

Accepted February 4, 2016

Published February 29, 2016

사재 케이블의 장력을 목표값과 유사하게 도입하는 것도 중요하지만 각 스트랜드별 장력의 균일성을 확보하는 것이 MS 케이블 시공의 핵심적인 사항이다. MS 케이블을 이용한 대부분의 장대교량은 Freyssinet에서 시공하였고, VSL과 Dywidag이 그 뒤를 따르고 있다. 국내에서는 많은 사장교 시공실적에도 불구하고 독자기술을 보유하고 있지 못한 채 해외기술에 의존하고 있다. 이에 FBG(Fiber Bragg Grating) 광섬유 센서기반의 로드셀을 활용한 FBG 균등긴장시스템이 개발되어[1,2], 2014년 6월부터 광양 태인2교(ED교) 케이블 가설에 적용하였다 [3,4]. 그러나, FBG 균등긴장시스템은 다음과 같은 문제점을 가지고 있어 건설현장에서 많은 어려움이 있었다. 이에 FBG 균등긴장시스템을 대체할 시스템 개발에 대한 필요성이 대두되었다.

- 첫째, FBG 센서의 온도변화 민감도에 따른 별도의 온도보정계수 필요
- 둘째, FBG 균등긴장제어시스템 자체의 불안정
- 셋째, FBG 로드셀의抵내구성에 따른 잦은 파손 및 높은 수리비용
- 넷째, FBG 로드셀과 제어시스템간의 연결오류 및 일시적인 단절시, 측정하중값 초기화 문제



Fig. 1. Broken FBG(Fiber Bragg Grating) loadcell

따라서, 본 연구는 FBG 균등긴장시스템을 광양 태인 2교 현장에 적용하면서 확인된 문제점과 습득한 노하우, 현장기술자의 VOC를 바탕으로 케이블 가설의 작업성을 높이면서 추가적인 센서 및 장비의 도입을 최소화시켜 시스템을 단순화함으로써 현장기술자가 쉽게 사용할 수 있는 현장맞춤형 “전기저항식 균등긴장시스템” 개발을 추진하게 되었다.

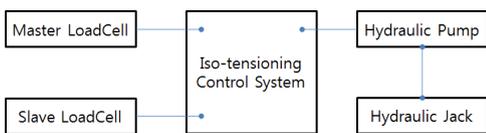


Fig. 2. Components of MS iso-tensioning system

2. 균등긴장시스템

균등긴장시스템의 하드웨어는 Fig. 2와 같이, 로드셀, 유압펌프 및 유압잭 그리고 제어시스템으로 구성되며, 이는 케이블 긴장/가설 작업에 있어 필요한 최소한의 장비이다. 로드셀은 Master 강연선(첫 번째 강연선)에 설치하는 “Master 로드셀”과 유압잭의 긴장력을 측정하기 위해 유압잭 앞에 설치하는 “Slave 로드셀”로 최소 2개의 로드셀이 구비되어야 한다.

2.1 균등긴장제어시스템

균등긴장제어시스템은 로드셀의 아날로그 신호를 디지털로 변환시키고 유압펌프에 작동-멈춤 신호를 보내는 채널부와 사용자와의 커뮤니케이션을 위한 LCD 및 키패드 그리고 로드셀의 하중데이터를 바탕으로 알고리즘을 연산하고 저장하는 MCU(Main Controller Unit)부, 제어시스템에 안정적인 전원을 공급하며 외부 전원공급이 차단될 경우 내장 배터리를 사용하여 제어시스템의 동작을 지속적으로 유지시킬 수 있는 전원부로 구성한다. 특히, 채널부는 인접한 다른 채널에 직, 간접적인 영향(간섭)을 주지 못하도록 물리적으로 분리(로드셀, 유압펌프와의 연결부를 하나의 독립채널로 패키징)하였다.

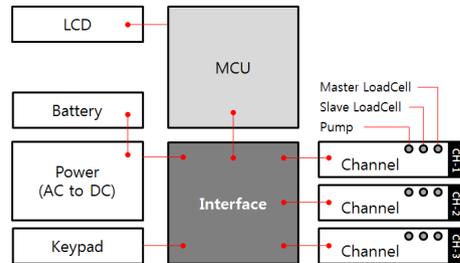


Fig. 3. Internal components of MS iso-tensioning controller

2.2 Master/Slave 로드셀

본 연구에서 채택한 “전기저항식 로드셀”은 상업용 전자저울에서부터 산업용 대용량 전자식 계량기에 이르기까지 각종 산업분야의 공장제어, 자동화 분야에 널리 사용되고 있는 스트레인 게이지(Strain Gage)를 이용한 하중감지센서(Sensor)로써, 외력에 대해 비례적으로 변하는 탄성체의 거동에 대해 내부에 부착된 스트레인 게이지가 이에 상응하는 저항변화량을 일으키고, 이러한 저항변화량은 휘스톤 브릿지(Wheatstone Bridge)에 의

해서 전압변화량의 값으로 환산하여 나타낸다. 그 관계식은 아래와 같다[5].

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2 + R_3} \right]$$

여기서, R : 스트레인 게이지 저항값

ΔR : 스트레인 게이지의 저항변화

V_{out} : 출력전압

V_{in} : 입력전압

본 연구에서는 2,200MPa 초고강도 강연선($\phi 15.7\text{mm}$) 규격 및 설계기준상 최대 긴장하중(ED교의 경우, $2,200\text{MPa} \times 150\text{mm}^2 \times 0.6 = 198\text{kN}$)을 고려하여 로드셀의 정격하중 용량(25ton) 및 내, 외경의 제원을 결정하여 Fig. 4와 같이 제작하였다.

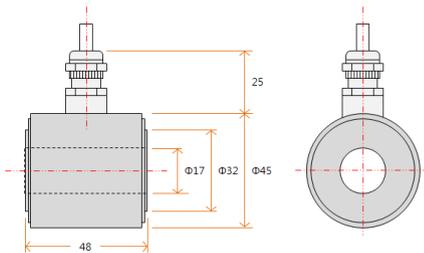


Fig. 4. Loadcell dimension

그 밖의 유압잭 및 유압펌프도 로드셀과 마찬가지로 2,200MPa 초고강도 강연선을 최대 긴장하중까지 긴장하기 위해서는 적정용량이 25ton 이상이어야 한다. 본 연구에서는 최대 35ton, 700Bar의 힘(압력)을 가할 수 있는 유압잭과 유압펌프를 선정하였다.

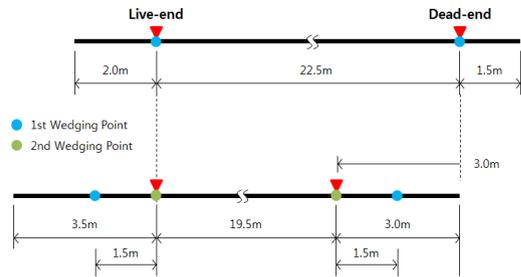


Fig. 5. Experimental set-up

3. 성능실험

연구개발한 “전기저항식 균등긴장시스템”의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 균등긴장 실험체를 설치하였다. 실험체는 웬지손실 등 정착부 손실이 자유장 거동에 영향을 주지 않을 정도의 충분히 긴 강연선을 사용하였고, 주탑 및 보강형 변위에 의한 케이블 강성변화를 모사할 수 있는 강성변화체(강성 29.089kN/mm)를 적용하였다[2].

균등긴장 실험은 Fig. 5에서 보듯이 고정단(Dead-end) 위치를 조정하여 총 2차례 수행하였다. 1차 실험에서는 가동단(Live-end)과 고정단(Dead-end)의 거리를 22.5m로 설정하였고, 2차 실험에서는 1차 실험에서 사용한 강연선을 그대로 사용하되, 강연선의 웬징 부위가 동일해지거나 가동단과 고정단 사이에 들어오지 않도록 고정단의 위치를 조정하여, 정착단간의 간격을 19.5m로 설정하였다.

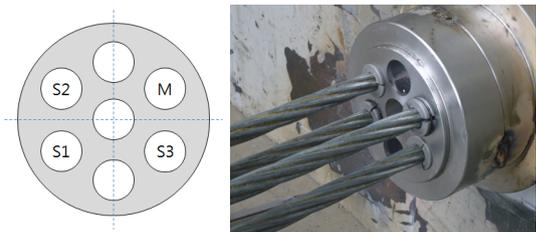


Fig. 6. Tensile head of live-end and dead-end

가동단 및 고정단의 정착부 인장헤드는 Fig. 6에 나타난 7-Hole을 사용하였으며, Fig. 6에서 “M”은 Master 강연선을, “S1~S3”은 Slave 강연선을 의미한다. 강연선 긴장은 M→S1→S2→S3의 순서로, 첫 번째 강연선(이하 ‘Master 강연선’)과 그 이후의 강연선(이하 ‘Slave 강연

선)을 Fig. 7과 같이 긴장하면서 Master 로드셀과 Slave 로드셀로 도입장력 및 긴장하중을 실시간으로 계측하며 균등긴장 실험을 수행하였다. 참고적으로, 균등긴장은 다음과 같이 이뤄진다.

첫째, Master 강연선을 사용자가 정의한 목표치까지 긴장한다.

둘째, Slave 강연선은 Master 강연선에 도입된 장력 변화를 모니터링하며, 두 강연선의 장력이 오차 범위내로 동일할 때까지 긴장한다.



(a) 1st strand (Master strand, M)



(b) 2nd strand (Slave strand, S1)

Fig. 7. Applying tensile forces on the strands

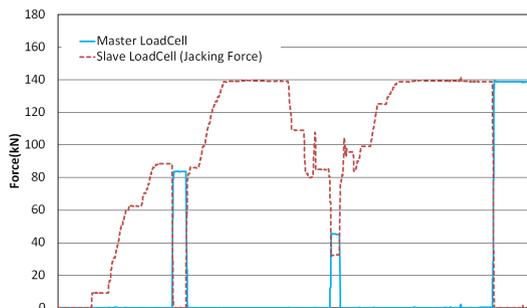


Fig. 8. Force measurements (M strand)

Fig. 8은 Master 강연선(M)을 긴장하면서 Master 로드셀과 Slave 로드셀에 의해 측정된 장력변화를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 Slave 로드셀의 측정값이 급격히 변하는 구간이 있는데, 첫 번째 구간은 유압잭의 Stroke 부족으로 유압잭의 긴장력을 일시적으로 Master 로드셀로 전달한 구간이며, 두 번째는 실험셋팅 과정에서 발생한 지지프레임과 강성변화체 사이의 유격이 실험이 진행되면서 순간적으로 밀착됨에 따라 일시적으로 강연선에 도입된 긴장력이 이완된 구간이다. 그리고 세 번째는 Master 강연선을 목표장력인 140kN까지 긴장한 후, 유압잭의 긴장력을 Master 로드셀로 전달한 구간이다. 여기서, “Master 로드셀로 전달했다”는 의미는 Fig. 9와 같이 Master 로드셀 뒤에 설치한 Rear Block에 앵지(Wedge)를 삽입하여 강연선을 임시 정착하였음을 의미한다.



Fig. 9. Temporary wedging by rear block

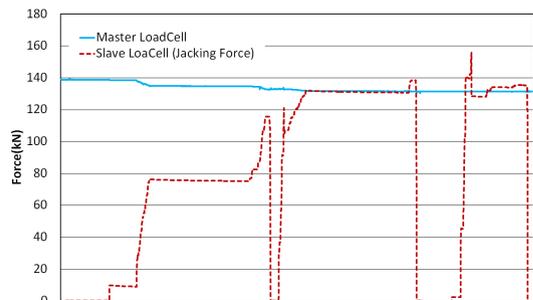


Fig. 10. Force measurements (M & S1 strand)

Fig. 10은 Slave 강연선(S1)을 긴장하면서 Master 로드셀과 Slave 로드셀에 의해 측정된 장력변화를 나타낸 것이다. Fig. 8과 같이 Fig. 10에서도 Slave 로드셀의 측정값이 급격히 0이 되는 구간이 발생하는데, 앞서 설명

한 바와 같이 유압잭의 Stroke 부족으로 더 이상의 긴장을 진행할 수가 없어 인장헤드에 Slave 강연선(S1)을 일시적으로 정착시킨 구간이다. 이후, 유압잭으로 강연선을 재긴장하면서 인장헤드에 정착된 앵지를 빼내야하기에 순간적으로 높은 긴장력이 도입되었다. 아울러, Fig. 10에서 Slave 강연선(S1)의 최종 긴장력(Slave 로드셀의 측정값)이 Master 강연선의 도입장력(Master 로드셀의 측정값)보다 다소 큰 이유는 Slave 강연선을 앵지로 인장헤드에 정착과정에서 앵지슬립에 의한 장력손실이 발생하므로, 이를 고려하여 추가 긴장하였기 때문이다.

강연선 ‘S1’을 정착한 후, 동일한 방법으로 강연선 ‘S2’, ‘S3’을 차례대로 긴장, 정착하면서 Slave 로드셀로부터 측정한 긴장력과 Master 강연선(M)의 장력변화를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다.

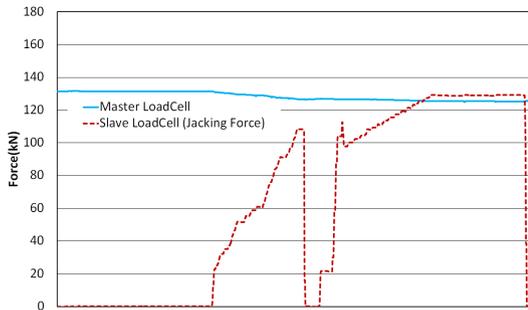


Fig. 11. Force measurements (M & S2 strand)

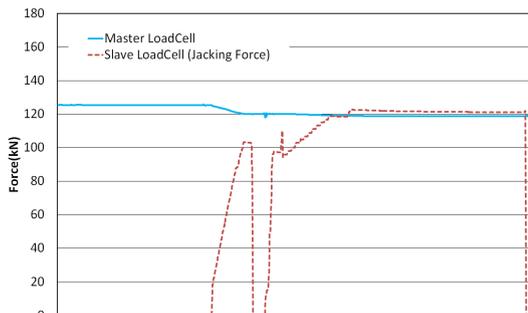


Fig. 12. Force measurements (M & S3 strand)

Slave 강연선(S1, S2, S3)을 차례대로 긴장, 정착과정에서 Master 강연선에 최초 도입된 장력이 점차 감소한다. 이를 종합하여 Master 강연선의 장력변화를 단계별로 Fig. 13에 나타내었다. Master 강연선에 최초 도입된

장력이 Slave 강연선 긴장으로 인해 선형적으로 감소하며, 최종장력은 최초장력에 비해 약 14.4% 정도 감소한 119kN으로 나타났다.

이를 강성변화체(Fig. 5 참조)의 스프링강성 29.089kN/mm를 고려하여 강연선별 도입장력을 영향매트릭스를 통해 계산한 해석치(Analytical Simulation)와 비교한 결과, 2% 이내의 오차를 나타내며 유사한 거동특성을 나타내었다. 즉, 본 실험을 통해 장력도입시스템(H/W)과 장력 제어시스템(S/W)을 종합적으로 검증하였으며, 결론적으로 개발된 “전기저항식 균등긴장시스템”은 Freyssinet, VSL 등의 선진시스템과 동등한 성능의 수준임을 확인할 수 있었다.

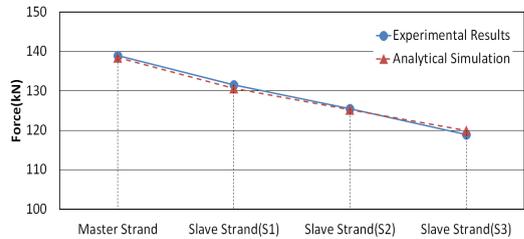


Fig. 13. Change of the tensile force of master strand (M)

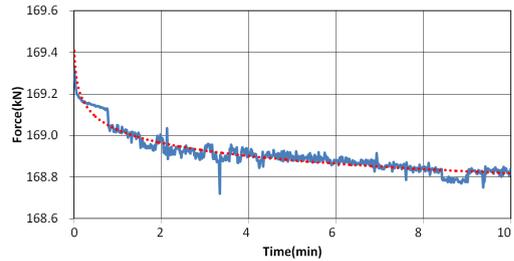


Fig. 14. Loss of tensile force due to wedge slip

한편, 강연선을 앵지로 정착한 직후 추가적인 장력손실량을 확인하기 위하여 10분간 장력변화를 모니터링하였으며, 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 앵지가 정착된 후 초기 짧은 시간에 장력이 급격히 감소하였지만 곧 안정화되었으며, 그 전체 변화량은 0.286%로 미미하였다. 이로써, 강연선을 인장헤드에 정착하는 과정에서 발생하는 앵지슬립에 의한 장력손실량이 상대적으로 크므로, 이를 반드시 고려하여 추가 긴장력을 현장에서 정확히 산정하여야겠다.

4. 현장적용

본 연구를 통해 개발한 “전기저항식 균등긴장시스템”에 대해 성능실험을 완료한 후, 광양 태인2교의 두 번째 주탑부(PY2)의 케이블 가설에 현장적용하였다. 광양 태인2교는 광양제철소와 태인동 연관단지를 연결하는 교량으로서, 교량형식은 1면 2주탑 PSC 박스거더를 갖는 엑스트라도즈(Extra-Dosed)교이고, 교량연장은 215.6m(56.8m+102m+56.8m), 폭원은 28.5~32.5m(왕복 4차선)이다. 첫 번째 주탑부(PY1)의 사재케이블은 “FBG 균등긴장시스템”로 가설하였다.



Fig. 15. 2nd Tain bridge and field application of electrical resistance iso-tensioning system

Fig. 15는 광양 태인2교 전경 및 전기저항식 균등긴장시스템이 케이블 가설현장에 적용된 모습이다. 17개의 강연선으로 이루어진 케이블이 좌우로 2개씩 배치되어 한 작업공간에서 총 34개의 강연선을 차례대로 균등긴장작업을 수행하였다.

긴장작업은, Master 강연선을 목표장력(171kN)까지 긴장, 정착한 후 나머지 16개의 Slave 강연선을 Master 강연선의 현재장력에 맞춰 긴장, 정착하는 일련의 과정을 반복하였으며, 그 중 마지막 7th 케이블의 단계별 긴

장이력을 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서, Master 강연선에 도입된 최초장력이 마지막 17번째 Slave 강연선의 긴장작업 완료 후 얼마나 감소하였는지를 Table 1에 정리하였으며, 이를 해석치(Analytical Simulation)와 비교하였다. 허용오차범위 내에서 강연선 긴장작업이 이뤄졌으며, 그 변화량은 평균적으로 3.55kN으로써 해석치에 근사적으로 나타났다.

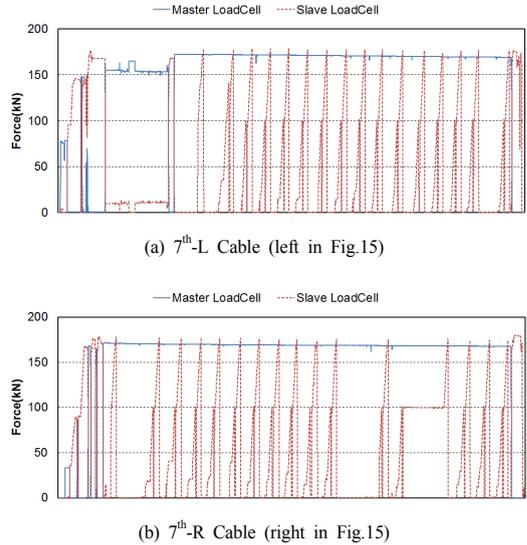


Fig. 16. Jacking and tensile force on master/slave strand

Table 1. Tensile force of master strand (7th cable)

| Cable No. | Tensile Force | | Δ |
|-----------------------|---------------|-------|-----|
| | Initial | Final | |
| 7 th -L | 171.8 | 168.6 | 3.2 |
| 7 th -R | 171.4 | 167.5 | 3.9 |
| Analytical Simulation | 170.7 | 167.3 | 3.4 |

광양 태인2교의 케이블 긴장작업에서 새로 개발한 “전기저항식 균등긴장시스템”은 “FBG 균등긴장시스템”과 비교하여 작업성, 내구성 및 시스템 자체의 안정성 측면에서 월등히 우수하였으며, 2015년 7월에 케이블 긴장작업을 예정대로 모두 완료하였다.

3. 결론

MS(Multi-Strand) 케이블은 여러 개의 강연선을 개별로 긴장하여 가설하므로, 각각의 강연선에 장력이 균등

하게 도입되는 것이 핵심 기술이다. 이를 위해, 첫 번째 긴장하는 강연선에 Master 로드셀을 설치한 후 연속적으로 도입장력을 모니터링하고, Slave 로드셀은 강연선의 긴장력을 측정하면서 상호간 오차범위내로 동일할 때까지 제어해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Master 강연선과 Slave 강연선의 장력변화를 실시간으로 예측하며 긴장, 제어하는 알고리즘을 개발하였고, 기존 “FBG 균등긴장시스템”에서 확인된 문제점을 보완하여 건설현장 여건에 최적화된 “전기저항식 균등긴장시스템”을 개발하였다.

2,200MPa 초고강도 강연선을 기반으로 균등긴장 성능실험 및 광양 태인2교 현장에 적용하여 사재케이블 가설까지 성공리에 마무리한 “전기저항식 균등긴장시스템”은, 노화~구도 연도교(ED교) 사재케이블(일본 스미토모社의 에폭시 코팅 강연선) 가설에도 곧 적용될 예정이다.

본 연구를 통해, 지금까지 해외의 장비 및 S/W에 의존하던 MS 균등긴장시스템에 대하여 독자적인 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Jun J.T., Kim C.H., Kim H.B., Ahn D.G., "A Study on the Development of Iso-Tensioning System for Cable-Stayed Bridges using FBG Sensors", Korean Society of Civil Engineers(KSCE), Proceeding of the Annual Conference of the KSCE, 2010.
- [2] Kim H.K., Kim C.H., "Experimental Analysis on Equivalent Tensile Force of Multiple Strand Cable", Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection(KISMI), Proceeding of the Spring Conference of the KISMI, 2013.
- [3] Ko Y.K., Kim C.H., Chun K.S., Chung K.S., "Application of High Strength Cable and MS Cable Tension System to 2nd Taein Bridge (Extra-Dosed)", Korean Institute of Bridge and Structural Engineers (KIBSE), Proceeding of the Annual Conference of the KIBSE, 2014.
- [4] Ko Y.K., Kim C.H., Choi S.C., Jung S.J., Seong T.R., Kim J.K., "Design and Construction of 2nd Taein Bridge(Extra-Dosed) using 2,200MPa MS(Multi-Strand) Stay Cable and 2,400MPa PT(Post-Tensioning) System", Computational Structural Engineering Institute of Korea, Technical Articles, Vol.27, No.3 pp.49~54, 2014.
- [5] Yang C.Y., "Principles of Loadcell", Monthly Magazine of Auto Control & Inspection, Special Articles, April, 2002.

박 원 태(Won-Tae Park)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 정교수

<관심분야>

구조공학, 복합재료, 좌굴해석, 비선형 구조해석, 동적해석, 나노구조의 해석

천 경 식(Kyoung-Sik Chun)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 9월 ~ 2011년 11월 : (주)바우건설타트 기술연구소 차장
- 2011년 12월 ~ 현재 : (주)포스코건설 R&D센터 책임연구원

<관심분야>

복합재료, 구조해석, 교량설계, BIM, 케이블 건설성/진동성 평가