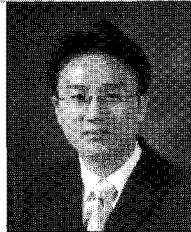


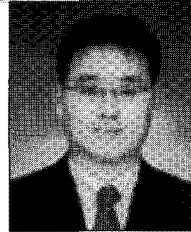
FBG 센서를 이용한 Multi-Strand 형식

사장교 케이블의 장력 측정 연구

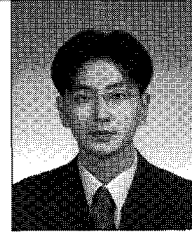
Monitoring of Cable Force on Cable-Stayed Bridge of Multi-Strand type using FBG Sensors



박 대 용*



김 성 호**



김 도 균**

* 대림산업(주) 특수교량팀 과장
** 대림산업(주) 특수교량팀 대리

1. 서 론

사장교, 현수교, 아치교의 행어 등과 같은 구조에서 케이블은 하중을 분담하는 중요한 부재이다. 공용중 이러한 교량의 케이블은 부식, 피로, 응력 재분배 등과 같은 영향으로 인해 설계당시의 성능을 충분히 발휘하지 못하게 되며 손상되기 쉽다. 특히 FCM으로 가설되는 콘크리트 사장교의 경우 시공중 케이블 장력에 따라 보강형에 균열 등과 같은 구조적 결함이 발생하기 쉽다. 시공중 케이블의 장력에 따라 보강형 응력 상태가 매우 민감하게 변화하게 되므로 정밀한 장력 측정은 성공적인 교량 건설에 매우 중요한 항목이다. 또한, 공용중 케이블의 장력 측정 통해 구조물의 안전성을 판단할 수도 있으므로 유지관리에 있어 주요 항목이기도 하다.

최근 케이블 장력 측정을 위해 전기저항식 변형률 게이지, 가속도계, 전자기 센서 등이 널리 사용되고 있다. 그러나 전기저항식 변형률 게이지와 같은 종래의 센서는 케이블 장력을 측정하기에 시공이 불편하고 전기적인 잡음, 전기 케이블 길이가 길어질 경우 송신 능력이 저하되는 등 기술적인 한계가 있다. 가속도계의 경우 Multi-strand 방식의 케이블에 설치할 경우 케이블을 보호하는 HDPE 관에 설치되므로 인해 장력 측정값의 정확도가 저하되는 단점 등이 있다.

또한 시공 중에는 많은 케이블 장력 조정시기가 있으며 케이블 장력조정을 위해서는 조정하고자 하는 인근 케이블의 장력 분포를 측정하고, 이를 반영하여 케이블 장력조정량을 결정해야 한다. Multi-strand 사장교의 경우 현재는 직접 작업원이 인장단에서 Mono Jack을 설치하고 Lift-off test를 수행한 후 장력을 측정하는 방법이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 경우 케이블 장력 측정을 위해 많은 시간이 소요되며 공사 기간에 차질을 발생시킨다. 따라서, 원하는 시기에 원하는 케이블에 대해 즉시 케이블 장력을 측정하기 위해서는 실시간 모니터링 시스템이 구축되어야 한다.

케이블 장력 측정에 있어 최근에는 이상과 같은 종래 센서의 문제점을 극복하기 위해 광섬유를 사용한 센서가 많이 개발되고 있다(Zhou et al., 2005, Zhou et al, 2004). 그러나 대부분 PWS 방식 케이블에 매립하는 형태의 FBG 센서가 개발되었으며, Multi-strand 방식의 케이블 장력 측정용으로 많은 개발은 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구에서는 Multi-strand 방식의 케이블을 갖는 사장교에 적합한 FBG 센서 및 센서 고정용 지그를 개발하고 이를 현재 건설중인 제2돌산대교의 사장교 케이블에 적용하여 단기 및 장기 장력을 실시간으로 모니터링하였으며, 그 결과를 분석하였다.

2. 계측센서 및 계측시스템

2.1 계측기기

본 연구에서는 Multi-strand의 장력 측정을 위해 광섬유 센서를 Multi-strand 케이블의 보강형측에 부착하고 전용 데이터 로거를 사용하여 데이터를 수집하였으며, 광섬유 센서의 정확도를 비교하기 위해 전기저항식 로드셀을 주탑측 앵커리지에 설치하였다.

광섬유센서의 데이터를 취득하는 광데이터로거는 Micron optics社의 SM125 모델을 사용하였으며, 로드셀의 데이터를 취득하는 데이터로거는 Campbell Scientific社의 CR1000을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 계측기기 사양은 표 1과 같다.

2.2 계측센서

본 과업에서 사용된 계측센서의 형식은 크게 광섬유센서

와 전기저항식 로드셀로 구분할 수 있으며, 광섬유센서의 경우에는 Strain meter 타입으로 선정하였으며, 선정된 Strain meter 타입의 광섬유센서는 기존 진동현식 타입의 강선변형률계와 유사한 형식으로 강선에 체결할 수 있는 지그를 이용한 방식으로 특수 제작한 형식이다.

케이블 정착구에 설치되는 로드셀의 경우에는 전기저항식 타입의 로드셀을 사용하였으며, 실제 교량의 케이블 정착구에 설치할 수 있도록 제원과 용량을 특수 주문 제작하여 사용하였다. 이상에서 본 과업에 사용된 계측센서의 사양은 표 2와 같다.

2.3 광섬유기반의 변형률 센서 (Strain meter)

본 연구에서 개발한 케이블 장력 측정용 FBG센서는 다음 그림 1과 같이 계측신호를 전달하는 광케이블, 광케이블과 센서 연결부를 보호하는 부츠, 광섬유센서가 고정되는 고정하우징, 광섬유센서를 보호하는 보호튜브, 센서와 지그를 연결하는 지그 체결용 볼트 및 광섬유센서의 파장을 설

표 1 계측기기 사양

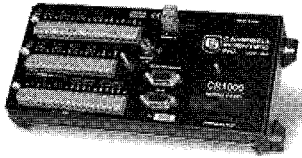

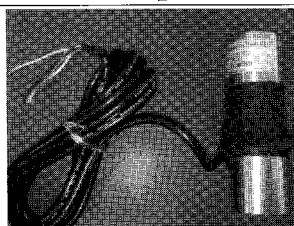

계측센서	사양		그림
정적데이터로거	모델	CR1000	
	측정채널	8 ch	
	측정속도	1초/ch	
	CPU	Hitachi 6303	
	메모리	2MB (옵션 4MB)	
	제 작 사	Campbell Scientific(미국)	
광데이터로거	모델	sm125-500	
	측정채널	4 ch	
	측정속도	2Hz	
	사용온도범위	0~50℃	
	특이사항	광섬유센서 전용	
	제 작 사	Micron optics(미국)	

표 2 계측센서 사양

계측센서	사양		그림
로드셀	모델	CX97-T12	
	제 원	높이 100mm, 직경 35mm	
	형 식	전기저항식	
	Range	120 kN	
	사용온도	-10 ~ 50℃	
	입출력저항	1.2 mV/V	
	제 작 사	다셀 (한국)	
광섬유센서	모델	Strain type	
	형 식	광섬유	
	Range	±4000µε	
	사용온도	-20 ~ 80℃	
	분해능	1µε	
	제 작 사	FBG Tech(한국)	

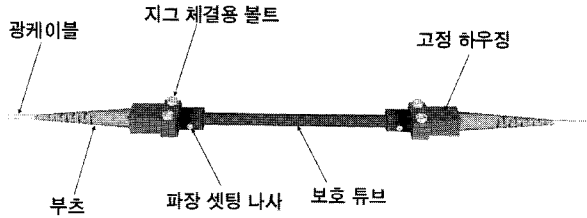


그림 1 케이블 장력 측정용 FBG센서

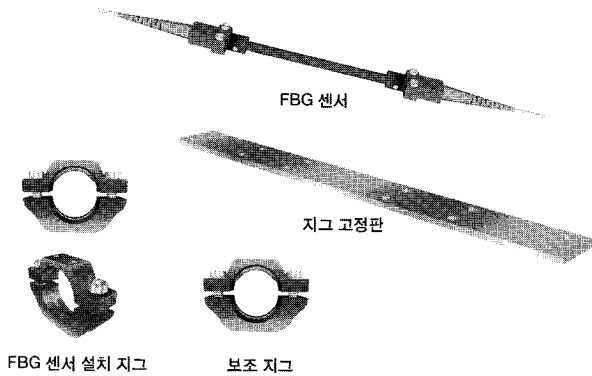


그림 2 케이블 장력 측정용 FBG센서 시스템의 구성

정할 수 있는 파장 셋팅 나사로 구성된다.

본 연구에서 개발한 케이블 장력 측정용 FBG센서를 사용하여 케이블 장력을 측정하기 위해서는 FBG센서와 함께 설치용 지그, 보조 지그 및 지그 고정판 등의 추가적인 기구가 요구된다. 그림 2와 같이 개발된 센서 시스템은 FBG 센서, 지그 및 지그 고정판으로 구성되며, 지그는 강선과 센서의 체결을 위해 사용되는 기구이며, 보조 지그는 추가적으로 센서 지그 바깥부분에 보조 지그를 설치함으로써 FBG센서에서 발생할 수 있는 슬립을 보조 지그 범위 내로 한정하는 기능과 함께 인접 케이블이 설치된 FBG센서에 직접적으로 닿지 않게 하는 기능을 하게 된다. 또한, 지그 고정판은 센서와 지그의 연결을 보다 신속하고 정확하게 하기 위하여 고안된 기구이다. 즉 지그 고정판에는 센서의 좌우측에 있는 지그 체결용 볼트간의 간격과 동일한 제원으로 지그를 설치할 수 있는 구멍이 가공되어 있으며, 이를 이용하여 센서와 지그를 바로 연결하는 것이 아니라, 지그를 지그 고정판에 먼저 설치한 후 이를 강선에 완벽하게 체결한 후 지그 고정판을 제거하고 그 부분에 센서를 교체 설치하는 방법으로 설치하게 된다. 이러한 방법으로 시공간에 센서 설치 시간을 획기적으로 감소시킬 수 있으며, 지그간의 거리를 정확하게 확보함으로써 센서 설치시 발생할 수 있는 센서의 틀어짐 등의 현상을 미연에 방지할 수 있다.

이러한 시스템을 사용하여 케이블 장력 측정용 FBG 센서의 설치 순서는 그림 3과 같다.

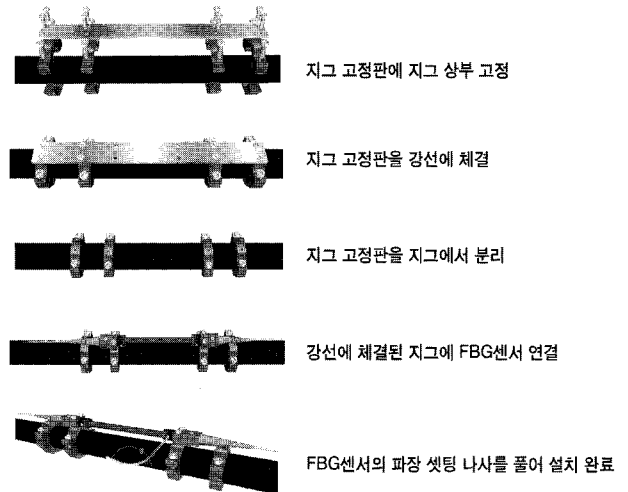


그림 3 케이블 장력 측정용 FBG센서의 설치 순서

3. 현장적용 실험 (제2돌산대교)

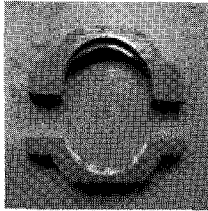
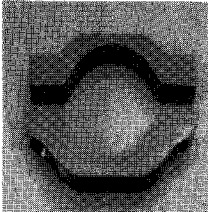
3.1 실험개요

현장적용 실험에 앞서 공인시험기관(계명대학교 첨단건 설재료시험센터)에서 2010년 9월 08일에 실내실험을 통해 최적의 지그형태를 도출하였고, 로드셀과 FBG 센서와의 장력측정 결과 비교 검증 시험을 수행후 제2돌산대교 현장에 적용하였다. 실내실험에서 사용된 지그는 표 3과 같다.

본 연구에서는 실내 지그 검증 테스트를 통해 검증된 표 3과 같은 돌기가 있는 지그와 없는 지그를 각각 사용하여 제2돌산대교의 케이블 장력을 모니터링하는 현장실험을 수행하였다. 제2돌산대교 현장 실험은 PY2에서 주경간 방향으로 가설되는 CM13번 좌측 케이블을 대상으로 수행되었으며, 좌측 CM13번 케이블의 마스터 케이블에는 전기저항식 로드셀을 설치하여 FBG 센서에서 측정된 장력값과 비교하였다. 현장실험은 2010년 9월 29일~2010년 9월 30일에 걸쳐서 수행되었으며, FBG 센서 설치 전경은 그림 4와 같다.

제2돌산대교 현장 실험은 CM13번 케이블의 긴장작업시 케이블의 긴장력을 측정하는 것 외에도 CM13번 케이블 가설이 완료된 이후 장기적으로 케이블의 긴장력을 모니터링 하는 것을 목적으로 하고 있다. 제2돌산대교 현장 실험과 관련된 주요 현장 공정은 표 4와 같고, FBG 센서는 돌기가 있는 것과 없는 것을 각각 사용하여 CM13번 케이블의 마스터 케이블에 그림 5와 같이 상하부로 설치하였다. 주탑방향으로 설치된 것을 상부에 설치된 센서로 설정하였으며, 상부에 돌기가 있는 지그를 사용하였으며, 하부에는 돌기가 없는 지그를 사용하여 각각 설치하였다.

표 3 실내 지그 검증 실험에 사용된 지그 형태

지그명	지그사진	지그 설명 및 검토 항목
돌기있는 지그		<ul style="list-style-type: none"> 3중방식 Multi-strand 케이블에 있어 강선과 HDPE 코팅계면의 slip을 방지할 목적으로 돌기 설치 지그 설치시 조임 정도에 따른 센서값 변화 확인
돌기없는 지그		<ul style="list-style-type: none"> 지그에 돌기가 없는 기존에 테스트를 수행했던 지그 돌기있는 지그에 비하여 단면이 더 두꺼워 높은 강성 확보 가능 돌기가 있는 경우와 비교하여 계측값 상대비교

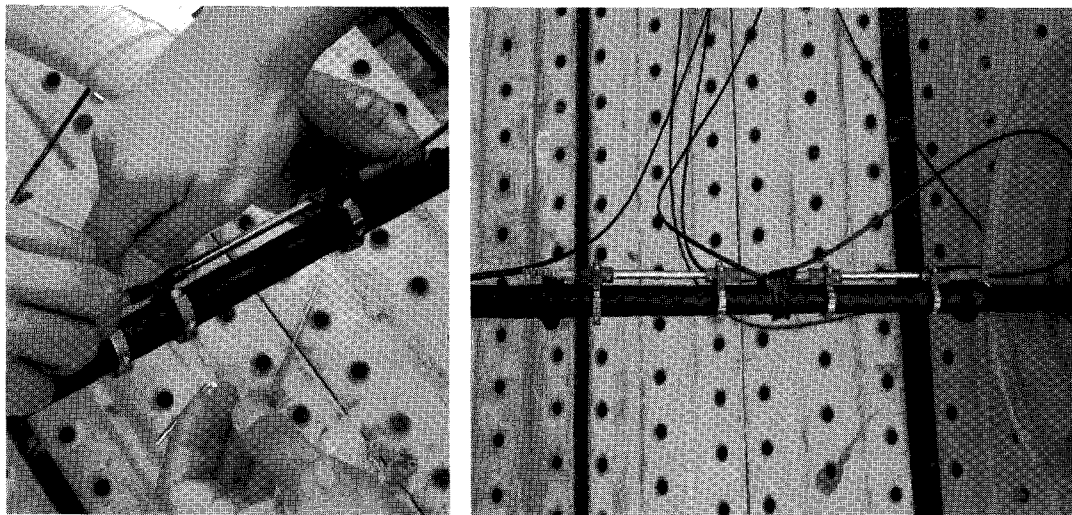


그림 4 제2돌산대교 현장 실험에서 FBG 센서 설치 전경(2010년 9월 29일)

표 4 제2돌산대교 주요 현장 공정

주요 현장 공정
○ 9월 29일 : 제2돌산대교 CM13번 케이블의 좌측 마스터 스트랜드에 FBG센서 설치
○ 9월 30일 : 제2돌산대교 CM13번 케이블 긴장완료
○ 10월 6일 : 콘크리트 1차 타설 및 양생
○ 10월 11일 : 1차 케이블 장력 조정
○ 10월 12일 : 콘크리트 2차 타설 및 양생

한편, 제2돌산대교의 CM13번 케이블의 마스터 케이블의 재료물성치는 케이블 공급회사인 고려제강(주)에서 제출한 Mill sheet상의 탄성계수 및 단면적을 사용하였으며 탄성계수는 193,200MPa이며, 단면적은 153.1mm²이다. 돌기가 없는 지그는 고유파장인 1,560대역, 돌기가 있는 지그는 1,570대역으로 설정하였으며, 각각 변형률 환산계수는 800과 793이다.

3.2 실험결과

3.2.1 케이블 설치시 장력 측정 결과

표 5와 표 6은 각각 CM13 케이블의 마스터 스트랜드 긴장시 돌기있는 지그와 돌기없는 지그의 FBG 센서 및 로드셀 계측결과이다. 표 5-1 및 표 6-1은 마스터 스트랜드 긴장시 측정된 Raw data를 나타낸 것이며, 표에서와 같이 하중을 나누어서 인장하였고 변형률은 21kN에서 시작하여 57.6kN까지 측정하였다. FBG 센서는 온도에 매우 민감한 센서이므로 온도 보정을 위해 별도의 온도 FBG 센서를 설치하여 계측한 후 FBG 센서에서 출력된 값을 보정하였다. 표 5-2 및 표 6-2는 표 5-1과 표 6-1에서 계측된 값에서 초기 인장하중 21kN에 대하여 하중을 초기화하여 나타낸 것이다.

표 5와 표 6을 비교해 보면 표 5의 결과가 표 6의 결과에

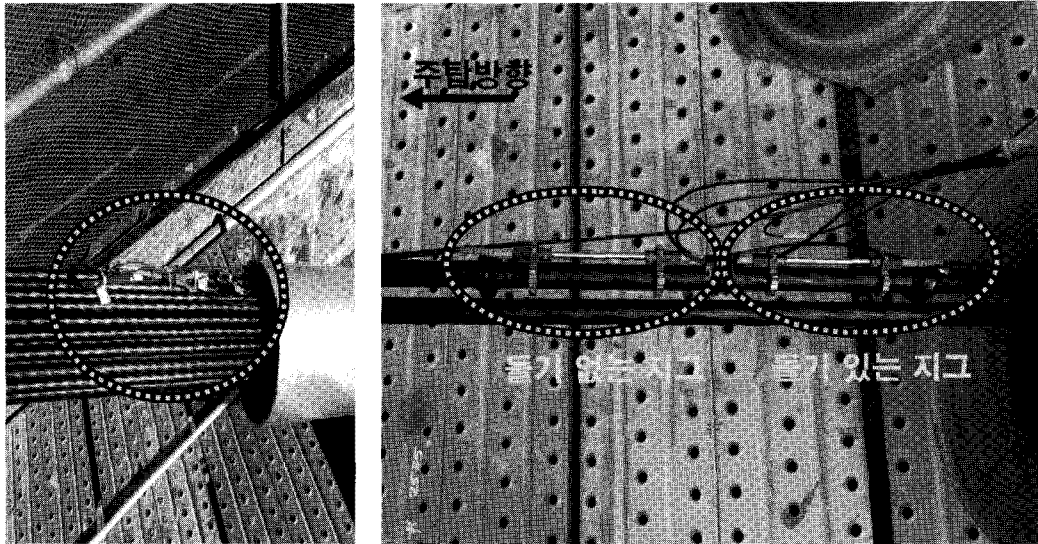


그림 5 제2돌산대교 현장 시험시 센서 설치 방법

비해 장력이 약간 크게 측정 되는 것으로 나타났다. 그 이유는 돌기 있는 지그가 장력이 커짐에 따라 소선과 HDPE

튜브 계면에 발생하는 slip의 영향을 감소시키며 장력이 커짐에 따라 돌기 있는 지그가 좀 더 좋은 성능을 발휘할 것

표 5 CM13 케이블의 마스터 스트랜드 긴장시 돌기있는 지그 사용한 FBG센서의 계측결과

표 5-1	Master strand		FBG		Temp. FBG	
	인장하중(kN)	변형률(με)	Raw data	Strain(με)	Raw data	Strain(με)
	21.00	710.0	71.7092	57367.4	19.0920	15273.6
	40.10	1355.7	72.3780	57902.4	19.0993	15279.4
	49.90	1687.0	72.8224	58257.9	19.1010	15280.8
	57.60	1947.3	73.1590	58527.2	19.1012	15281.0

표 5-2	Conversing data							
	①Master strand		②FBG	③Temp. FBG	④=②-③	⑤ ΔLoadCell	⑥ΔFBG	⑦수렴도
	인장하중 (kN)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	⑥/⑤(%)
	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0			
	19.10	645.7	535.0	5.8	529.2	344.8	333.5	96.7%
	28.90	977.0	890.6	7.2	883.4	331.3	355.5	107.4%
	36.60	1237.4	1159.8	7.4	1152.5	260.3	269.3	103.6%

표 6 CM13 케이블의 마스터 스트랜드 긴장시 돌기없는 지그 사용한 FBG센서의 계측결과

표 6-1	Master strand		FBG		Temp. FBG	
	인장하중(kN)	변형률(με)	Raw data	Strain(με)	Raw data	Strain(με)
	21.00	710.0	62.9560	49924.1	19.0920	15140.0
	40.10	1355.7	63.7070	50519.7	19.0993	15145.7
	49.90	1687.0	64.1517	50872.3	19.1010	15147.1
	57.60	1947.3	64.4827	51134.8	19.1012	15147.3

표 6-2	Conversing data							
	①Master strand		②FBG	③Temp. FBG	④=②-③	⑤ ΔLoadCell	⑥ΔFBG	⑦수렴도
	인장하중 (kN)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	Strain (με)	⑥/⑤(%)
	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0			
	19.10	645.7	595.5	5.8	589.8	344.8	332.6	96.4%
	28.90	977.0	948.2	7.1	941.1	331.3	352.6	106.5%
	36.60	1237.4	1210.7	7.3	1203.4	260.3	262.5	100.9%

으로 판단된다.

3.2.2 주요 공정별 케이블 장력 측정결과

CM13번 케이블 가설이 완료된 이후 현장에서 발생한 주요공정은 표 4에 설명한 바와 같이 Seg 12 콘크리트 타설 및 양생, CM13번 케이블의 1차 장력 조정, Seg 12의 2차 타설 및 양생 작업이 진행되었다. 본 연구에서는 CM13번 마스터 스트랜드에 설치되어 있는 FBG센서와 로드셀을 가설 이후에 1시간 주기로 지속적인 모니터링을 실시하였으며 로드셀의 결과와 FBG 센서의 결과를 비교하여 개발된 시스템의 정밀도 및 활용성을 검토하였다.

한편, FBG 센서의 장기데이터 분석을 위해서는 FBG 센서 데이터에서 자체 온도변형을 소거하고, 계측된 외부온도에 대한 케이블 온도변형량을 추가적으로 소거해야 한다. 본 과업에서 FBG센서 및 케이블의 온도변형량 자체의 영향을 각각 평가하기 위하여 온도영향을 단계별로 소거하여 분석하였으며, 주요 공정별로 측정된 결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서와 같이 콘크리트 1차 타설 완료 후 로드셀의 계측데이터를 분석한 결과, 일변화 경향은 약 3~5kN의 장력값 변화가 나타나 1차 타설 전보다 다소 일변화 폭이 증가한 것으로 나타났다. 1차 케이블 장력조정 시점에서 로드셀로 측정된 장력값의 증가량은 약 33kN으로 나타났으며, 이 값은 장력 증가 이론값인 31.19kN의 103%에 해당하는 값으로 로드셀은 장력 증가량을 비교적 정확히 계측하고 있는 것을 알 수 있다. 콘크리트 1차 타설 완료 후 FBG 센서의 데이터를 분석한 결과, 일변화 경향은 약 3~6kN의 장력값 변화로 나타났으며, 1차 케이블 장력조정 시점이 10월 11일 8시경이며, 이후 안정화 시점을 10월 11일 18시경이라고 가정했을때, 돌기가 있는 지그를 사용한 경우

39.61kN, 돌기가 없는 지그를 사용한 경우 55.02kN의 장력 증가가 발생하였다. 이 결과를 로드셀 데이터와 비교하면, 돌기가 있는 지그가 돌기가 없는 지그에 비해 보다 정확하게 장력증가분을 나타내는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 Multi-strand 방식의 케이블 사장교에 적합한 FBG 센서 및 센서 고정용 지그를 개발하고 콘크리트 사장교인 제2돌산대교의 케이블에 적용하여 단기 및 장기 장력을 실시간으로 모니터링하였으며, 그 결과를 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 케이블 설치시 장력을 모니터링 한 결과 돌기 있는 지그 및 돌기 없는 지그로 설치된 FBG 센서는 로드셀 결과와 비교시 4%~7% 범위의 오차를 보였으며, 정확한 결과를 나타내었다. 또한 돌기있는 지그가 돌기없는 지그에 비해 좀 더 큰 장력 결과를 나타내었으며, 돌기있는 지그에 있어 장력이 계속 증가할 경우 소선과 HDPE 코팅 계면에 발생하는 slip 현상을 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 장기 데이터 분석을 위하여 센서자체의 온도변형과 케이블의 온도변형을 소거한 온도보정을 통해 로드셀과 유사한 결과를 산출할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 현장 공정에 근거하여 약 한달간의 데이터를 분석한 결과 돌기가 있는 지그가 더 정확하게 긴장력 변화를 계측 가능함을 확인하였다.

본 연구의 FBG 센서 및 센서 지그를 활용한 모니터링 기법은 시공중 및 공용중 케이블 장력 측정에 매우 유용한 방법으로 실용화 될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 시공중 케이블 장력 측정이 많은 경우 공사시간을 크게 단축할 수

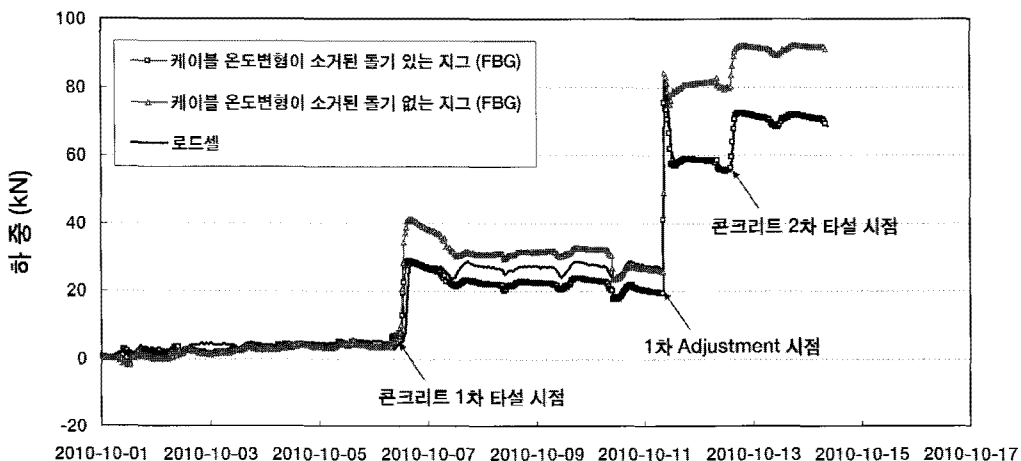



그림 6 1차 콘크리트 타설, 1차 케이블 장력 조정, 2차 콘크리트 타설에 따른 계측결과

있을 것으로 판단된다. 제2돌산대교의 경우 케이블 장력 조정은 각 케이블별로 적게는 3회에서 많게는 5회까지 수행되었으며 장력 조정시마다 많은 Lift-off test를 수행하였고 많은 인력 손실이 발생하였다. 본 연구에서 개발된 시스템을 적용하여 시뮬레이션 할 경우 장력 측정을 위해 필요한 약 60일의 공기단축이 가능하며 비용으로 계산할 경우 약 2억여원의 비용절감이 가능한 것으로 나타났다.

추후 Multi-strand 케이블의 모든 케이블 장력측정을 위한 실시간 모니터링 시스템 구축 및 무선랜 환경을 동시에 구축하여 스마트 폰 및 PDA에서 장력을 실시간으로 확인할 수 있도록 할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 대림산업 기술개발원 특수교량팀 (2010) “IT 기반 센서를 활용한 케이블 장력 SMART 모니터링 시스템 개발”, 대림산업 기술개발원 연구과제 보고서.
2. 김재민 외 (2008) “광섬유센서가 내장된 강연선을 이용한 교량의 장력 모니터링 방법,” 한국전산구조공학회 논문집 제21권 제3호.
3. Zhou, Z., Zhang, Z., Deng, N., Zhao, X., Li, D., Wang, C., and Ou J. (2005) “Applications of FRP-OFBG sensors on bridge cables”, SPIE Proceedings, 5765, pp. 668-677, 2005.
4. Zhou, Z., Zhao, X., Wang, C., Zhang, Z., Hu, Q., and Ou, J. (2004) “A new kind of smart bridge cable based on FBG sensors”, SPIE Proceedings, 5502, pp. 196-199. 

[담당 : 강형택, 편집위원]