진동법을	이용한 시장교	시공단계별 케이블	를 장력관리		
Cable Te	Cable Tension Force Management Using Vibration Method at Cable Stayed Bridge Construction Stages				
박 연 수 [*] Park, Yeon-Soo	전 동 호 ^{**} Cheon, Dong-Ho	전 양 배 ^{~~} Cheon, Yang-Bae	강 경 구 […] Kang, Kyoung-Koo		

Abstract

Design and construction of long-span bridge are recently increasing by development of computer technology. Specially, cable stayed bridge and suspension bridge having cable component are representative of long-span bridge may do. Therefore, this paper a present a methodology for cable tension force monitoring in cable-stayed bridge under construction using acceleration data acquired by the vibration method. To improve accuracy construction, all stay cables are measured, according to 4-step construction stage and change of temperature.

요 지

최근 컴퓨터 기술의 발달로 장대교량의 설계 및 시공이 증가하고 있다. 특히 케이블 요소를 갖는 사장교와 현수교는 장대교량을 대표한다 할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 사장교로 시공중인 제2진도대교에 대하여 시공단계별로 전체케이블에 대한 장력을 측정하여 시공오차 등에 따른 장력보 정값을 현장에서 즉시 제시하여 시공정밀도를 향상하고자 하였다. 이에 적용된 장력측정방법은 간접 법인 가속도센서를 이용한 진동법을 적용하였다.

직접법에 비해 비교적 간편한 간접인 진동법을 통하여 보다 쉽게 장력을 추정할 수 있었으며, 시공 의 정밀도를 향상시키기 위하여 전체 케이블을 4가지 시공단계별로 장력변화량을 모니터링하여 케이 블 가설시 시공오차에 대한 장력보정값을 현장에서 제시하였다. 또한, 최종장력값을 설계값과 비교한 결과 간접법을 이용한 장력값과 유사한 것을 알 수 있었다. 그리고 온도 변화에 따른 케이블의 장력변 화를 추후 유지관리 계측시 관리한계치 설정에 참고자료로 활용할 수 있도록 장력변화를 파악하였다.

Keywords : Cable Stayed Bridge, Vibration Method, Cable Tension Force Monitoring System 핵심 용어 : 사장교, 진동법, 케이블장력계측시스템

^{*} 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

^{**} 전남대학교 토목공학과 박사과정

^{*** (}주)에이티맥스 대표이사

E-mail: muzero@hanmail.net, 016-475-1334

[•] 본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 컴퓨터를 이용한 설계기술 및 재료, 시공기술 의 발달로 인하여 장지간을 갖는 장대교량의 설계 및 시공이 급증하고 있다. 그중에서도 케이블 요소를 이 용한 현수교와 사장교는 장대교량을 대표한다 할 수 있겠다. 이들 구조물에서 케이블이 전체 구조계에 미 치는 영향은 매우 크며, 적절한 구조해석을 위해서는 케이블의 거동에 대한 연구 및 케이블의 장력 변화에 따른 구조계의 변화를 연구해볼 필요가 있다.⁽¹⁾ 따라 서 본 연구에서는 사장교 시공단계에서 적절한 구조해 석을 위해 필요한 케이블의 장력을 간접측정 방법인 진동법을 이용하여 케이블 장력을 측정하고, 측정장력 을 통해 케이블시공시 발생하는 시공오차에 대한 보정 값을 현장에서 즉시 제공하여 시공정밀도를 향상시키 고자 하였다.

2. 이론적배경

2.1 케이블장력추정을 위한 유효길이산정

유효길이는 양단 고정단으로 지지된 케이블에서의 측정값을 양단 힌지로 지지된 해석모델로 분석하기 위 한 추정 값이다.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 케이블



Fig. 1 케이블 유효길이

제작장 길이에서 정착구 길이와 베어링 플레이트값과 심 플레이트값을 뺀 NET.길이를 유효길이로 산정하 여 장력측정에 이용하였다.

2.2 진동방정식에 의한 케이블 장력추정

케이블의 장력은 케이블이 인장됨에 따라 고유진동 수가 변화하는 특성을 이용하여 평가할 수 있다. 케이 블의 휨강성(EI)은 실제로 케이블의 길이, 장력 또는 힘에 의하여 변화된다고 판단되나, 장력측정이 주목적 이므로 전 길이에 걸쳐 항상 일정하다고 가정한다. 케 이블의 진동방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$\frac{\mathbf{w}}{\mathbf{g}} \frac{\partial^2 \mathbf{z}}{\partial t^2} + \mathbf{E} \mathbf{I} \frac{\partial^4 \mathbf{z}}{\partial \mathbf{x}^4} - \mathbf{T} \frac{\partial^2 \mathbf{z}}{\partial \mathbf{x}^2} = 0$$
(1)

여기서, z : 보의 처짐량, x : 보의 길이방향 좌표 w : 케이블의 단위중략, g : 중력가속도

식(1)에 양단 힌지의 경계조건을 이용하여 미분방 정식의 해를 구하면 식(2)와 같다.

$$\mathbf{T} = \frac{4\mathbf{w}\mathbf{L}_{\text{eff}}^2}{\mathbf{g}} \left(\frac{\mathbf{f}_n}{n}\right)^2 - \frac{\mathbf{E}\mathbf{I}\pi^2}{\mathbf{L}_{\text{eff}}^2} \mathbf{n}^2 \tag{2}$$

여기서, T : 케이블장력, L_{eff} : 케이블유효길이 F_n : 고유진동수, n : 진동차수

또한, 식(2)를 최소자승법을 이용 일차 회귀항으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2g}{4wL_{eff}^4}n^2 = b + an^2 \quad (3)$$

여기처,
$$T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \times b$$
, $EI = \frac{4wL_{eff}^2}{\pi^2 g} \times a$

따라서, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 1차 회기식으 로부터 매개변수 a(기울기)와 b(y절편)를 구하면, 케 이블의 장력과 휨강성을 산정할 수 있다.

에이블 연호	1015.1	· 축합시강	11415628	****	2004-0-23
w(1/m)	8.0439	再業副市(100)	174.15	11(1時(清井辺兼中)	1
计算机中心计	고유감황구비	17	15/10/2	2187/Lai	· 2011년 (141
		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1			100000000
	2.441	16	8.372405		
5	3.076	25	0.279471		
+	3.642	36	8.072507		
	4.257	- 10	0,376821		
	4.383	84	0.372558		
	6.0.2	- 10	ili 375905		
10.	6.112	100	0.079471		0.373036
11	8.788	123	0.075212		
12	3.319	144	8.177508		
10.	8.000	160	3.079456	6.0000066	
14	8.143	100	8.001100		
15.	9.229	225	3.31653		
36	3.013	250	0.219995		
11	10.490	289	15.301343		
18	83.888	204	0.392542		
151		100			
18					
19					
29					
25		1			

Fig. 2 차수별 고유진동수를 이용한 장력산정예

3. 시공단계별 케이블 장력측정

3.1 교량개요

해남과 진도를 연결하는 제2진도대교는 1등교로 설 계되어 완공후의 모습은 Fig. 3과 같다. 형식은 3경 간 비대칭사장교로서 중앙경간 344m, 측경간 70m 총 484m로 건설된다. 또한 현재 보강형 및 케이블가 설공사는 완료된 상태이며, 추가적으로 포장공사 등의 부대공만을 남겨놓고 있다.



Fig. 3 제2진도대교



Fig. 4 진도측 케이블번호

3.2 장력측정 대상구간

본 연구에서 측정대상으로 선정한 구간은 Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 진도측의 JC1~JC15으로 총 15개의 케이블에 대하여 시공단계별 장력측정을 실 시하였다.

3.2.1 장력측정 시험 절차

케이블의 장력을 측정하는 절차는 시험과 해석으로 나눌 수 있다. 먼저 시험은 케이블에 가속도계를 부착 하여, 고무햄머를 통한 케이블 가진을 실시하고 이때 발생하는 진동신호를 수집한다. 수집된 시간영역 데이 터를 다시 고유진동수 영역 전환을 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 해석을 통하여 고유진동수를 구하고, 장력추정시 적용된 고유진동수 차수는 1~20 차 까지를 적용하였다. 적용된 고유진동수를 진동법을 이용하여 장력을 산정할 수 있다.

3.2.2 계측기의 선정 및 위치

가속도계는 진동을 측정하기 위한 가장 기본적이고 중요한 기기이다. 따라서 시공단계에서 케이블 장력을 측정하기 위해서는 가속도계에 의해 얻어지는 가속도 신호를 FFT분석을 이용하여 고유진동수를 파악하는 것이 필요하다.⁽³⁾

가속도계의 측정방향은 케이블의 진동방향으로 배치 되어야 하며, 위치는 단부의 소켓 등에 의한 영향을 적게 받을 수 있는 부분에 설치하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 단부에서 최대한 떨어진 곳에 가속도계 를 설치하여 진동신호를 획득하였다.

본 연구에서 사용한 가속도계는 Fig. 5 및 Table 1에 나타낸 바와 같이 민감도가 좋고 장기적인 유지관 리모니터링 시스템이 가능한 센서를 사용하였다.

가속도계로부터 전달되는 아날로그형 시그널은 증 폭, 필터링, 그리고 디지털로 변환되어 현장의 데이터 저장장치에 저장된다. 그러나 이 디지털 데이터는 단 지 전기 신호로서, 우리가 필요한 공학적 의미를 갖는 데이터로의 변환이 필요하게 된다. 이러한 일련의 과 정을 신호처리라고 하며, 다시 수집과 추출로 대별된 다. 앞에서 언급한 세가지 과정, 즉 증폭에서 디지털

계측센서	항 목	사양	
	모 델	8312A2	
	형 식	Capacitive Type	
1축 가속도계	측정범위	$0.03 \sim 300 \text{ Hz}$	
	Range	±2g	
	사용온도	-40 ~ 85℃	
	제조회사	kistler (미국)	

Table 1 가속도계사양



Fig. 5 계측센서 및 케이블 부착모습



Fig. 6 FFT 해석을 통한 결과 예

로의 변환이 수집에 해당되면, 이는 주로 데이터 수집 장치의 기능과 성능에 좌우된다.^{(3),(4)}

그러나 구조물의 형태, 측정치의 종류, 모니터링의 목적에 따라 증폭률, 수집빈도, 기간이 달라져야 하며, 하드웨어의 고유 노이즈, , 환경 노이즈 등을 감안한 필터링 알고리즘의 선택이 고려되어야 한다.⁽⁵⁾

Fig. 6는 필터링이 완료된 상태의 FFT해석 결과의 예를 보여주고 있다. x축은 주파수(Hz), y축은 크기 (Amp.)로 나타내어진다. 이 때의 최대치들이 바로 고 유진동수가 되는데, 주기가 가장 긴 즉 주파수가 가장 낮은 최대치가 1차 고유진동수가 되며, 주파수가 커짐 에 따라 각각의 최대치값들이 각 차수별의 고유진동수 가 된다. 3.2.3 케이블제원

본 연구에서 수행한 각 케이블에 대한 제원은 Table 2과 같다.

3.3 시공단계별 케이블장력

케이블의 시공단계별 장력은 Fig. 7와 같이 시간영 역에서의 신호를 측정하여 Fig. 8과 같이 주파수영역

Table 2 케이블 제원

Cable	#7×	Area	단위하중	탄성계수	케이블
No.	Ψ/^	(m ²)	(ton/m)	$(tonf/m^2)$	단면도
JC1					
JC2					
JC3	151	0.005011	0.0476		
JC4	101	0.000611	0.0470		
JC5					
JC6					
JC7					고양도 흔려해있면
JC8	73	0.002809	0.0231	2.0E+07	
JC9					
JC10					网络安洁 奇位
JC11	100	0.00/105	0.0247		
JC12	109	0.004190	0.0547		()
JC13					
JC14					
JC15	139	0.005349	0.0439		



Fig. 7 시간영역 진동가속도



Fig. 8 주파수영역 고유진동수

으로의 FFT변환을 통해 각 차수별 고유진동수를 추 출하였다. 그리고 마지막으로 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 장력산출프로그램을 통해 최종적으로 긴장 후 정 착이 끝난 케이블에 인입된 장력을 산출하였다.

시공단계별 장력측정결과는 Table 3에 나타낸 바와 같다.

4. 케이블 장력측정 결과분석

4.1 시공단계별 케이블 장력변화

본 연구에 대상이 되는 사장교의 시공은 크게 4단 계로 분류된다. 첫째는 보강형인양을 위한 데릭크레인 의 이동, 둘째는 데릭크레인을 이용한 보강형 인양 및

공정별 시공단계	장력측정결과(tonf)		
쾨이브 6 7번 기자	JC 6	JC 7	
게이글 0, 7번 신상	92.4	81.7	
케이브 5 8버 기자	JC 5	JC 8	
제기철 3, 0년 전 8	93.4	76.2	
케이블 9번 긴장	84	l.1	
케이블 4번 긴장	88	3.8	
케이블 10번 긴장	10	2.8	
케이블 11번 긴장	11	1.8	
케이블 3번 긴장	12	5.9	
케이블 3번 추가긴장	14	4.6	
케이블 6번 추가긴장	181.1		
케이블 12번 긴장	136.9		
케이블 2번 긴장	179.1		
케이블 13번 긴장	173.0		
케이블 4번 추가긴장	229.8		
케이블 14번 긴장	16	3.4	
케이블 5번 추가긴장	27	5.6	
케이블 6번 2차 추가긴장	22	3.8	
케이블 1번 긴장	223.9		
케이블 15번 긴장	185.7		
케이블 3번 추가긴장	211.5		
케이블 3번, 15번 추가기장	JC 3	JC 15	
	229.1	201.7	
케이블 14번 추가긴장	174.1		
I	ᅨ얍		

Table 3 시공단계별 장력측정결과

Table 4 Key Seg 접합후 케이블 장력측정결과

	장력측정결과(tonf)				
케이블 번호	Key Seg 접합직후	데릭퇴장 및 불평등하중제거후			
JC1	221.4	179.2			
JC2	212.6	174.6			
JC3	232.6	193.1			
JC4	206.7	171.9			
JC5	239.1	236.5			
JC6	232.9	252.9			
JC7	62.4	59.0			
JC8	56.7	52.8			
JC9	68.6	63.8			
JC10	92.1	77.3			
JC11	105.1	83.9			
JC12	125.4	101.7			
JC13	136.0	115.4			
JC14	170.4	148.5			
JC15	202.9	185.8			

거치, 셋째는 거치 후 용접, 넷째는 케이블 설치 및 긴장으로 나타낼 수 있다. 따라서 케이블 설치후 위의 용접공정을 뺀 나머지 공정에서 기존에 설치된 케이블 의 장력은 변화하게 된다. 이러한 장력변화를 Fig. 9 및 Fig. 10, Table 5와 Table 6에 나타낸 바와 같 이 주공정인 케이블 인장력 도입공정에 따른 각 케이 블의 장력변화를 나타내었다. 최초 케이블 장력 도입 후 90tonf 가량의 데릭크레인 무게로 인하여 장력변 화가 발생한다.

인접케이블인 7번 케이블의 경우 실측값은 81.7tonf 에서 116.7tonf으로 증가하여 약 42.8%의 장력증가 를 보이며, 설계값은 84.6tonf에서 97.8tonf으로 약 15.6%의 변화를 보인다. 또한 측경간의 6번케이블의 장력변화는 실측값의 경우 92.4tonf에서 109.4tonf 으로 증가하여 약 18.4%가 증가를 하며, 해석값의 경 우 105.6tonf에서 115.2tonf으로 약 9.1% 증가한 다. 이렇게 실측값의 변화량과 해석값의 변화량차이는 시공오차에 의한 변수를 포함하지 못하여 발생하는 것 으로 보이며, 시공단계별로 실측값을 통한 역해석으로 지속적인 구조물 안전도를 평가하였다.



Fig. 9 6번 케이블의 시공단별 장력변화



Fig. 10 7번 케이블의 시공단별 장력변화

데릭크레인 이동 후의 공정인 보강형 인양에 따른 장 력증가는 데릭크레인이 위치하는 7번케이블의 경우 실 측값이 116.7tonf에서 145.0tonf으로 24.3%의 장력 증가가 나타났으며, 해석값은 97.8tonf에서 136.8tonf 으로 약 39.9% 증가하였다. 또한 측경간의 6번케이블 의 경우는 109.4tonf에서 137.2tonf으로 25.4%의 장 력증가가 나타났으며, 해석값은 115.2tonf에서 141.1tonf 으로 약 22.5%로 증가하였다. 추가 케이블긴장 이외 의 시공단계에 있어 데릭크레인 이동에 따른 장력변화 는 데릭크레인이 이동해 위치하는 7번케이블이 측경간 의 6번 케이블의 장력변화보다 약 24.4% 더 크게 장 릭변화가 일어났으며, 해석값 또한 동일함을 확인할 수 있었다.

반면, 8번 보강형 인양후, 5번과 8번 케이블의 긴 장에 따른 장력변화는 6번 케이블과 7번 케이블 모두 실측값과 해석값이 유사한 값을 나타내었는데, 이는 보강형 가설에 따른 구조적 안정상태를 나타내고 있는 것으로 사료된다. 따라서 데릭크레인을 이용한 보강형

Table 5 6번케이블 시공단계별 장력변화

્રમો		시공단계별] 장력변화	
0년 케이블	기존케이블	데릭크레인이	보강형인양	추가케이블
110	장력	동 후 장력	후 장력	긴장 후 장력
실측값	92.4	109.4	137.2	77.3
해석값	105.6	115.2	141.1	75.9

Table 6 7번케이블 시공단계별 장력변화

7버	시공단계별 장력변화				
7년 케이블	기존케이블 장력	데릭크레인이 동 후 장력	보강형인양 후 장력	추가케이블 긴장 후 장력	
실측값	81.7	116.7	145.0	86.8	
해석값	84.6	97.8	136.8	86.2	

인양방법으로 사장교를 시공할때에는 케이블에 장력을 도입하는 단계도 중요하지만, 그 전 단계인 데릭크레 인의 이동 및 보강형 인양에 있어서도 케이블의 장력 변화에 미치는 영향이 크므로, 데릭크레인의 이동이나 보강형 인양을 하는 시공공정에 있어 좀더 세심한 주 의가 필요한 것으로 사료된다.

4.2 최종케이블장력값과 설계값의 비교· 분석

15번 케이블 설치 후 선형관리를 통해 Key Seg 접 합이 이루어 진다. 중앙부 Key Seg접합후에는 완성 계의 거동을 하게 되고, 추가적으로 진행되는 부가작 업에 따른 장력의 변화는 크게 나타나지 않는다. 장력 변화가 이루어지는 시기는 추후에 케이블에 추가사하 중 및 댐퍼설치에 따른 유효길이의 변화 등으로 미세 하게 변화 할 것이다. Key seg 접합후의 실제 장력 값과 해석값의 비교를 통해 각 케이블에 걸려 있는 최 종도입장력에 대해 두 값사이의 추세를 보면 다음과 같다.

Table 7은 Key Seg접합후의 값을 실측값과 해석 값, 오차의 순으로 정리한 것이다. Table 7에 나타낸 바와 같이 실측값과 해석값의 오차는 2~28tonf으로 나타났으며, 케이블 길이가 다른 케이블에 비해 비교

장력값	실측값	해석값	오차값	오차량
Cable No.	(tonf)	(tonf)	(tonf)	(%)
JC1	179	162	17	9.5
JC2	175	161	14	8.0
JC3	193	167	26	13.5
JC4	172	169	3	1.7
JC5	237	228	9	3.8
JC6	253	248	5	2.0
JC7	59	57	2	3.4
JC8	53	50	3	5.7
JC9	64	62	2	3.1
JC10	77	70	7	9.1
JC11	84	81	3	3.6
JC12	102	100	2	2.0
JC13	115	113	2	1.8
JC14	149	130	19	12.8
JC15	186	158	28	15.1

Table 7 각 케이블 시공 후 장력측정결과

적 긴 JC1~JC3과 JC14, JC15에서 오차가 가장 크게 발생하였다. 또한 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 실측값과 해석값의 다소간의 오차는 있으나, 추세선의 경향이 큰 차이를 보이지 않고 유사한 형태를 나타내 는 것을 알 수 있다. 이는 진동법을 이용하여 시공중 에 케이블장력값을 도출하고 이를 바탕으로 시공중 선 형관리가 가능함을 나타낸 다고 할 수 있겠다.

4.3 온도에 따른 케이블의 장력변화

본 연구에 대상이 되는 사장교는 형식이 보강형 및 주탑의 재질이 강교이므로, 콘크리트 재질에 비해 온 도에 의한 영향이 크다고 할 수 있다. 그리고 케이블 또한 온도에 영향을 많이 받으므로, 온도변화에 따른 장력변화를 알아 볼 필요가 있다. 이에 케이블 설치하 는 시간때인 새벽과 하루중 온도가 가장 많이 올라가 는 오후 2시에서 3시사이에 케이블 장력값을 측정하 여 온도 변화에 따른 영향을 알아보았다.







Fig. 12 온도차에 의한 장력변화

Fig. 12 및 Table 8은 온도 변화에 따른 장력 변화를 나타내었다. Table 8과 같이 측정시간의 온 도는 새벽의 온도가 20℃, 오후측정시간의 온도는 32℃로 약 12℃의 차이가 났다. 12℃의 차이에 의 한 장력의 변화는 단순히 대기 온도차에 의한 케이 블의 단독적인 변화가 아닌 주형과 주탑의 온도차 에 의한 변화 요인과 케이블 자체의 온도변화에 의 한 변화요인과 관계가 있다고 할 수 있을 것이다. 따라서 온도변화에 의한 장력변화에 대하여 좀더 정밀한 방법을 통하여 대기온도변화 뿐아니라 주형 과 주탑의 온도변화, 케이블 자체의 온도변화에 의 한 장력변화를 관찰하여 케이블의 장력관리에 이용 해야 할 것으로 판단된다. 온도변화에 의한 케이블 의 장력변화는 0~14tonf으로 나타났으며, 중앙경 간의 케이블 보다는 측경간의 JC1~JC4에서 다른 케이블에 비해 비교적 큰 장력변화를 나타냈으나, 온도변화에 의한 장력변화는 그렇게 크지 않은 것으 로 나타났다.

장력값	실측값 (tonf)	실측값 (tonf)	변화값	변화폭
Cable No.	20°C	32°C	(tonf)	(%)
JC1	179	193	14	7.8
JC2	174	186	12	6.9
JC3	194	205	11	5.7
JC4	173	181	8	4.6
JC5	238	238	0	0
JC6	254	254	0	0
JC7	58	61	3	5.2
JC8	53	54	1	1.9
JC9	64	64	0	0
JC10	80	80	0	0
JC11	86	86	0	0
JC12	104	106	2	1.9
JC13	115	120	5	4.3
JC14	148	155	7	4.7
JC15	185	192	7	3.8

Table 8 온도차에 의한 장력측정결과

5. 결 론

본 연구에서는 시공중인 사장교의 케이블 장력을 진 동법을 이용한 간접법으로 측정하였으며, 시공공정별 케이블의 장력변화와 온도차에 의한 케이블의 장력변 화를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 시공단계에서 진동법을 이용하여 케이블의 장력을 보다 간편하고, 비교적 정확한 장력관리가 가능한 것으로 판단된다.
- 주요 시공단계별로 케이블의 장력변화를 모니터링 함으로서, 선형관리를 위한 단계별 설계값과 비교

분석이 가능하며, 이를 통하여 시공정밀도를 향상 시킬 수 있었다.

3) 대기온도의 변화에 따라 최대 14tonf의 장력변화 량을 나타내므로, 향후 유지관리 계측시 필요한 관 리기준치 설정은 이러한 온도변화에 따른 장력변화 량을 고려하여 설정해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 전남대학교 특별연구사업비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김상효, 이상호, 최수일, 여동훈, "진동법을 이용한 케이 블의 장력측정기법과 계측환경의 영향분석," 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 제2권 제29집, 1997, pp.143-150.
- Hiroshi Zui, Tohru Shinke & Yoshio Namita, "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method," Journal of Structure Eng., ASCE, Vol. 122, No.6, June 1996, pp.651–656.
- Tanaka, H., Kamei, M., & Kaneyoshi, M., "Cable Tension Adjustment by Structural System Identification," *Cable–Stayed Buidges Experiences & Practice*, Vol. 2, Nov. 1987, pp. 856–866.
- Randall, R. B., *Frequency Analysis*, Bruel & Kjaer Korea Ltd., 1987.
- Irvine, H.M., Cable Structures, MIT Press, Cambridge, Mass, 1981.
- Irvine, H.M. & Caughey., "The linear theory of free vibration of a suspended cable." Proc. Royal Soc., London, England, Series A, vol. 341., 1974

(접수일자:2004년 11월 12일)