단면감소에 따른 사장케이블의 2-자유도 근사모델의 고유진동수 분포

Distribution of Natural Frequency of 2-DOF Approximate Model of Stay Cable to Reduction of Area

조 양 희¹⁾
Yang-Hee Joe

이 현 철^{2)*}
Hyun-Chol Lee

Abstract

The cable damages of the bridge structures induce very important impact on the structural safety, which implies the close monitoring of the cable damage is required to secure sustained safety of the bridges. Most usual available maintenance techniques are based on the monitoring the change of the natural frequency of the structures by damages. However, existing method are based on vibration method to calculate lateral vibration and system identification can calculate the axial stiffness using sensitivity equation by trial error method. But the frequency study by the longitudinal movement need because of the sag effect in system identification. This study proposes a new method to investigate the damage magnitudes and status. The method improves the accuracies in the magnitudes and status of damages by adopting the natural frequency of longitudinal movement. The study results have been validated by comparing them with the approximate solution of FEM. Thus, the relationship of cable damage and frequency appear with relation that the severe damage has the little frequency. If we know the real frequency we can estimate the cable damage severity using this relationship. This method can be possible the efficient management of the cable damage.

Keywords : Cable Damage, Damage Magnitude, Natural Frequency Distribution, Axial Stiffness

1. 서 론

공용중인 구조물에는 재료특성의 변화, 단면의 변화, 경계 조건의 변화, 과도한 하중, 자연재해, 설계오류 및 시공결함 등으로 인하여 손상이 발생한다. 이와 같은 손상을 추정하는 보편적인 방법은 진동법을 이용하여 장력을 추정하는 방법이다. 진동법은 케이블을 보요소로 가정하여 케이블의 휨강성의 영향을 고려하며 진동방향은 횡방향이다. 기존 사장교 케이블에 대해서 진동법에 의한 상시 풍하중의 영향을 확인한 결과 횡방향 진동으로 인한 장력변화는 크지 않았다. 케이블 축강성의 추정이 가능한 시스템인식기법은 반복법에 의해서 민감도방정식을 이용하여 케이블의 비선형 유한요소 해석을 시행오차법으로 수행하여 케이블의 축강성을 추정하나 케이블의 새그가 작을수록 축방향운동에 대한 민감도가

기하학적으로 작아지기 때문에 종방향 운동에 대한 고유진동수의 추정연구가 필요함을 제시하였다. 이 연구에서는 케이블의 손상을 추정하기 위해서 종방향 운동에 대한 고유진동수 분포를 연구하고자 한다. 현재 다음과 같은 손상추정방법이 있다. 첫째는 Adams et al. (1978)이 제안한 진동모드 섭동이론에 근거하여 선형구조계의 구조특성변화를 추정하는 방법이며, 둘째는 Sundermeyer et al. (1993)이 제안한 진동 특성치의 변화를 파괴역학이론을 사용하여 해석하는 방법이며 셋째는 Kim et al. (2003)이 제안한 방법으로서, 진동모드의 변화를 사용하여 구조계의 손상도를 강도의 상대적인 변화인 손상지수로서 예측하는 방법이 있다. 이들 방법을 이용하여 손상을 추정하기 위해서는 계측기 등을 활용하나 그 손상추정방법이 복잡하므로 일상적인 손상추정을 하는 데에는 한계가 있다. 따라서, 이 연구에서는 실무적 편의를

1) 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 교수
2) 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 박사수료, 교신저자

* Corresponding author : lhc0414@chol.com

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

위해서 손상추정방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 사장교 케이블을 대상으로, 손상된 케이블구조계를 2-자유도계로 모델링하여 손상정도에 따른 고유진동수의 변화를 연구하였다. 기존 손상추정방법보다 편리하게 추정하는 간편법을 제안하였고 이 연구결과의 신뢰성을 확인하기 위해서, 2-자유도계에 의한 손상추정결과를 근사해인 유한요소해석 결과와 비교검증하였다.

2. 2-자유도계 근사모델

구조물은 여러 가지 요인에 의해 손상을 받게 되는 데 이때 손상된 구조계 (케이블시스템)를 2-자유도계로 모델링하여 고유진동수를 산정함으로써, 손상의 정도에 따라 손상과 고유진동수와의 관계를 이용하여 손상의 여부 및 손상의 정도를 확인하는 방법을 제안하였으며 구체적인 내용 및 방법은 다음과 같다.

케이블 손상에 대한 거동을 쉽게 확인할 수 있는 2-자유도계에 대해 모델링을 적용한다. 임의의 집중질량을 갖는 2-자유도계 케이블은 $f(t) = 0$ 인 비감쇠자유진동으로 다음 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 해석모델은 케이블의 면내거동을 파악하기 위하여 2-자유도를 갖는 모델로 구성하였다.

변위 x_1 과 x_2 는 각각 집중질량 m_1 과 m_2 의 변위를 나타낸다. 이 구조계의 강성은 선형강성 k_1 과 k_2 로 나타난다.

2-자유도계에 손상이 발생할 경우에는 다음과 같은 식 (1)로 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} (\alpha k_{11} + \beta \frac{m_2}{m_1} k_{22}) - \beta k_{12} & \\ -\beta k_{12} & \beta k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$(\alpha k_{11} + \beta \frac{m_2}{m_1} k_{22}) u_1^2 - 2\beta k_{12} u_1 u_2 + \beta k_{22} u_2^2 = 1 \quad (2)$$

여기서, $k_{11} = \frac{k_1}{m_1}$, $k_{12} = \frac{k_2}{\sqrt{m_1 m_2}}$, $k_{22} = \frac{k_2}{m_2}$ 로 표

Fig. 1 Idealized Two Degree of Freedom System with Lumped Masses

시되며 손상변수 α, β 는 요소의 강성 k_1 과 k_2 의 감소율을 나타내기 위해 사용되며 식 (2)는 타원방정식으로서 고유벡터인 $\{u\}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$ 로부터 손상을 나타내는 손상변수 (α, β) 를 구할 수 있다.

변수 u_2 는 변수 u_1 의 함수로 표현된다.

$$u_2 = \frac{1}{2\beta k_{22}} (2\beta k_{12} u_1 \pm 2\sqrt{-\beta \left(\frac{-\beta k_{12}^2 u_1^2 m_1 + k_{22} u_1^2 \alpha k_{11} m_1 + u_1^2 \beta m_2 k_{22}^2 - k_{22} m_1}{m_1} \right)}) \quad (3)$$

각각의 케이블내에서 질량과 강성이 일정하다고 ($m_1 = m_2$, $k_1 = k_2$) 가정하면 식 (3)은 식 (4)로 간략하게 나타낼 수 있다.

$$u_2 = u_1 \pm \frac{1}{\beta k_{11}} \sqrt{\beta k_{11} - \alpha \beta k_{11}^2 u_1^2} \quad (4)$$

식 (4)을 정리하면 다음 식 (5)로 표시할 수 있다.

$$u_2 - u_1 = \pm \frac{1}{\beta k_{11}} \sqrt{\beta k_{11} - \alpha \beta k_{11}^2 u_1^2} \quad (5)$$

식 (5)의 양변을 제곱하여 2차원 일반방정식으로 정리하면 식 (6)과 같다.

$$(\alpha k_{11} + \beta k_{11}) u_1^2 - 2\beta k_{11} u_1 u_2 + \beta k_{11} u_2^2 - 1 = 0 \quad (6)$$

여기서, 타원의 회전각을 구하기 위해서 식 (6)의 타원방정식으로부터 다음 식 (7) ~ 식 (12)를 이용하여 타원의 회전각을 구하면 식 (13)과 같다.

$$A = \alpha k_{11} + \beta k_{11} \quad (7)$$

$$B = -2\beta k_{11} \quad (8)$$

$$C = \beta k_{11} \quad (9)$$

$$D = 0 \quad (10)$$

$$E = 0 \quad (11)$$

$$F = -1 \quad (12)$$

$$\tan(2\theta) = \frac{B}{A-C} = \frac{-2\beta k_{11}}{\alpha k_{11}} = \frac{-2\beta}{\alpha} \quad (13)$$

여기서, 손상변수 α, β 가 동일하면 타원의 회전각 (θ)은 -31.717° 이다. 회전된 타원의 주축길이산정을 위해서 식 (14) ~ (20)을 이용한다.

$$\begin{aligned} A' &= A \cos^2(-31.717^\circ) + B \cos(-31.717^\circ) \sin(-31.717^\circ) + C \sin^2(-31.717^\circ) \\ &= 0.7236A - 0.447B + 0.276C \\ &= 0.7236\alpha k_{11} + 1.8936\beta k_{11} \end{aligned} \quad (14)$$

$$B' = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} C' &= A \sin^2(-31.717^\circ) - B \cos(-31.717^\circ) \sin(-31.717^\circ) + C \cos^2(-31.717^\circ) \\ &= 0.276A + 0.447B + 0.7236C \\ &= 0.276\alpha k_{11} + 0.1056\beta k_{11} \end{aligned} \quad (16)$$

$$D' = 0 \quad (17)$$

$$E' = 0 \quad (18)$$

$$F' = -1 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} a^2 &= \frac{-4F'A'C'}{4A'C'^2} = \frac{-F'}{C'} \\ &= \frac{1}{0.276\alpha k_{11} + 0.1056\beta k_{11}} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)을 통해서 타원의 주축길이 (a)는 식 (21)과 같이 표시된다. 식 (6)은 타원의 일반식으로서 손상변수 (α, β)가 동일할 경우 타원의 주축길이 (a)는 식 (21)과 같이 손상변수의 관계식으로 표시된다.

$$a = \frac{1}{\sqrt{0.276\alpha k_{11} + 0.1056\beta k_{11}}} \quad (21)$$

여기서, 타원의 주축길이 a 는 수학적으로 다음 식 (22)와 같다.

$$a = \|\vec{x}\| \quad (22)$$

식 (22)와 고유치와의 관계를 사용하면 다음 식 (23)으로 표시할 수 있다.

$$\lambda = \omega^2 = \frac{1}{\|\vec{x}\|^2} = \frac{1}{a^2} \quad (23)$$

식 (23), (21)을 이용하여 고유진동수와 손상변수와의 관계를 식 (24)로서 표시할 수 있다.

$$\omega = \frac{1}{a} = \sqrt{(0.276\alpha k_{11} + 0.1056\beta k_{11})} \quad (24)$$

식 (24)로부터 손상변수 (α, β)를 추정할 수 있다.

3. 적용 예 및 분석

2장에서는 구조계의 고유진동수를 도출함으로써 손상을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 적용과정에는 구조물을 2-자유도계로 이상화할 수 있다. 이 장에서는 5경간 대칭사장교 케이블을 대상으로 2-자유도계 방법의 적용결과에 대한 신뢰성을 검증하고 해석결과를 분석하였다.

3.1 대상교량

대상교량은 Fig. 3과 같은 형태의 주탑으로 구성된 5경간 대칭사장교로서 검증을 위해서 손상에 의한 케이블의 고유진동수 변화가 선형으로 예측되어 전체케이블중 길이 및 직경이 대표적인 3개의 케이블 (C15, C27, C45)을 선택하여 사용하였다. 이들 케이블의 단면적은 각각 (C15=7658mm², C27=4194mm², C45=9274mm²)이다. 사장교 케이블의 손상 정도 (손상률)를 단면적의 감소비가 10%, 20%, 30%로 가정하였다. 손상변수와 손상률의 관계는 다음과 같다.

$$\text{손상변수} = \frac{100\% - \text{손상률}}{100\%}$$

케이블 (C15, C27, C45)은 직경 7mm 소선 199개와 109개 및 241개로 구성되어 있고 그라우팅은 되어 있지 않다 (Fig. 2 참조).

Fig. 2 The Selected Cable Sections

Fig. 3 The Selected Cables

3.2 해석결과 및 분석

제안된 방법의 검증은 위해서 2-자유도계 방법에 의한 손상 추정방법을 사용하였다. 선택된 케이블을 대상으로 제안 방법의 적용 결과로 얻어진 각 케이블의 손상에 따른 고유진동수 변화를 전산프로그램 MIDAS (MIDAS IT, 2012)에 의한 유한요소법 (Finite Element Method : FEM) 해석결과와 비교함으로써 그 유효성을 검증하였다.

MIDAS해석을 위해서는 Fig. 4와 같은 케이블을 420개의 3차원 트러스요소로 모사하였으며, 진동방향은 부재축방향으로 가정하였고, 케이블의 수평력은 H , 길이는 L 이며 경사각은 θ° 로 표시하였다. 이때 케이블의 역학적 특성은 Table 1과 같다. Table 1의 직경 및 탄성계수 등은 인천대교 건설지를 참조하였다. Table 1에서 C45의 탄성계수가 C15와 C27의 탄성계수와 다른 이유는 설계당시의 조건에 의해 결정되었기 때문이다.

이와 같이 FEM해석에 의해 계산된 케이블의 손상수준별 고유진동수와 제안된 방법인 2-자유도계의 케이블 고유진동수 산정방법을 사용하여 계산된 각 손상수준별 고유진동수

Fig. 4 FEM Model of the Selected Cable

는 Table 2에 보인 바와 같다.

또, 두 방법의 해석결과를 Fig. 5에 비교하여 도시하였다. 여기서, 고유진동수의 운동방향은 케이블의 축방향이다.

Table 2에서 케이블의 경사각에 따라서 근사해석법의 정확도가 변하고 경사각이 수직에 가까울수록 즉, 면내거동이 지배적일수록 근사해석결과는 유한요소해석결과에 근접함을

Table 1 Mechanical Properties of the Cables

Cable Number	C15	C27	C45
Section Area (A), m ²	1.207E-2	7.389E-3	1.517E-2
Diameter (d), m	0.124	0.097	0.139
Length (L), m	236.000	112.100	326.000
Angle (θ), degree	40.296	82.310	26.125
Mass (m), kN · sec ² /m	15.297	4.079	26.514
Modulus of Elasticity (E), GPa	1.930	1.930	1.830
Initial State Tension, kN	3427.000	2220.000	4156.000

Table 2 Comparison of Natural Frequency by Damage Level

(a) Cable C15

Damage Level (%)	Present /FEM (%)	FEM Analysis		Present Method	
		Value (Hz)	Rate of Change, damaged/undamaged	Value (Hz)	Rate of Change, damaged/undamaged
0	97	0.162	1.00	0.157	1.00
10	94	0.157	0.97	0.147	0.94
20	93	0.147	0.91	0.136	0.87
30	91	0.137	0.85	0.124	0.79

(b) Cable C27

Damage Level (%)	Present /FEM (%)	FEM Analysis		Present Method	
		Value (Hz)	Rate of Change, damaged/undamaged	Value (Hz)	Rate of Change, damaged/undamaged
0	99	0.349	1.00	0.347	1.00
10	99	0.325	0.93	0.324	0.93
20	99	0.302	0.87	0.300	0.86
30	94	0.290	0.83	0.274	0.79

(c) Cable C45

Damage Level (%)	Present /FEM (%)	FEM Analysis		Present Method	
		Value (Hz)	Rate of Change, damaged/undamaged	Value (Hz)	Rate of Change, damaged/undamaged
0	93	0.119	1.00	0.111	1.00
10	92	0.113	0.95	0.104	0.94
20	91	0.106	0.89	0.096	0.86
30	89	0.099	0.83	0.088	0.79

알 수 있다. 이는 케이블의 고유진동수는 표준길이에 가장 민감한 분포를 나타내지만 케이블의 경사각에 따라 면내·외 진동모드의 전이가 발생하기 때문이다. 근사해석법을 적용할 수 있는 케이블 경사각의 범위는 경사각이 약 30° 이상일 경우에 유한요소해석결과와 근접하는 결과를 보이고 있다. Fig. 5에서 보듯이, 단면감소에 따라 근사해석모델은 선형성을 보이나 유한요소해석결과는 단면감소가 증가함에 따라 비선형성을 나타낸다. 그 이유는 단면감소는 케이블 장력을 증가시키고 케이블 장력증가는 케이블 강성도의 큰 증가를 나타내기 때문이다. 제안된 방법에 의한 고유진동수가

Fig. 5 Relationship of Frequency vs. Damage Level

FEM 해석에 의한 고유진동수보다 다소 작게 산정되었으며, 손상률이 커질수록 그 차이가 증가하는 (손상률이 30%인 경우 최대 12%차이) 경향을 보이고 있다. FEM해석에 의한 고유진동수는 케이블의 Poly Ethylene Tube에 의한 강성증가로 인하여 제안된 방법의 고유진동수보다 크게 산정되었다. C15, C27, C45에서 케이블의 길이가 짧을수록 고유진동수는 작게 나타났다. 이처럼 고유진동수를 알고 있을 때 손상여부와 그 정도의 추정이 가능하지만, 손상률이 커질수록 추정결과에 대한 편차가 커지는 경향을 나타내고 있다.

다양한 케이블의 종류 및 손상정도를 대상으로 이와 같이 제안된 방법을 이용하여, 실험실에서 손상정도와 고유진동수의 상관관계를 계산하여 데이터베이스를 구축하여, 고유진동수확인에 의하여 손상정도를 추정함으로써 케이블손상에 대한 효율적인 유지관리가 가능케 됨을 확인하였다.

Table 3, 4에서 손상률이 없는 경우를 기준으로 해서 손상률이 10%일 때 고유진동수는 약 10% 감소하였고, 손상률이 20%일 때 고유진동수는 약 12% 감소하였으며, 손상률이 30%일 때 고유진동수는 약 13% 감소하였다. 이는 손상률이 매 10% 증가할 때 마다 고유진동수가 일정하게 감소하지 않고 약 10%, 약 12%, 약 13%로 각각 변화하였다.

Fig. 6, 7에서 각 케이블의 단면감소율에 따른 고유진동수의 변화를 보여주고 있다. 케이블의 면내방향 고유진동수는 케이블의 길이뿐만 아니라 경사각에 따라서 비선형 분포를 나타낸다.

Table 5에서 Kim et al. (2008)이 현이론에 의해 고유진동수를 연구한 결과와 제안된 방법에 의한 고유진동수의 결과를 나타내었다. 현이론에 의한 고유진동수의 운동방향은 횡방향이며 제안된 방법에 의한 고유진동수의 운동방향은 축방향이다. 현이론에 의한 고유진동수는 단면감소율이 없는 경우에 대한 결과이다. 케이블 C27에서 C52까지의 케이블에 대해서 현이론과 제안방법의 고유진동수를 비교해볼 때

Table 3 Natural Frequency by Damage Level (C01~C26)

Cable ID	Natural Frequency (Hz)			
	Damage Level (0%)	Damage Level (10%)	Damage Level (20%)	Damage Level (30%)
C01	0.093	0.084	0.074	0.065
C02	0.095	0.086	0.076	0.067
C03	0.098	0.088	0.078	0.068
C04	0.100	0.090	0.080	0.070
C05	0.103	0.092	0.082	0.072
C06	0.104	0.093	0.083	0.073
C07	0.106	0.096	0.085	0.074
C08	0.112	0.101	0.090	0.079
C09	0.115	0.103	0.092	0.080
C10	0.122	0.110	0.097	0.085
C11	0.132	0.119	0.105	0.092
C12	0.138	0.125	0.111	0.097
C13	0.146	0.132	0.117	0.102
C14	0.149	0.134	0.119	0.104
C15	0.158	0.142	0.126	0.110
C16	0.168	0.151	0.134	0.118
C17	0.196	0.176	0.156	0.137
C18	0.201	0.181	0.161	0.141
C19	0.218	0.196	0.174	0.153
C20	0.211	0.190	0.169	0.148
C21	0.227	0.204	0.182	0.159
C22	0.251	0.226	0.201	0.176
C23	0.278	0.250	0.222	0.194
C24	0.285	0.257	0.228	0.200
C25	0.294	0.265	0.235	0.206
C26	0.346	0.311	0.276	0.242

Fig. 6 Comparison of Frequency to Damage Level (C01~C26)

현이론에 의한 고유진동수가 제안방법의 고유진동수 대비 약 2.788배~3.313배 크게 나타났다.

Fig. 8에서 케이블길이에 따른 고유진동수의 변화를 현이론과 Fig. 1에서 수평으로 놓인 케이블에 대하여 2-자유도의 근사해석모델을 이용한 제안방법과 비교하였다. 여기에서 Cord

Table 4 Natural Frequency by Damage Level (C27~C52)

Cable ID	Natural Frequency (Hz)			
	Damage Level (0%)	Damage Level (10%)	Damage Level (20%)	Damage Level (30%)
C27	0.347	0.313	0.278	0.243
C28	0.297	0.267	0.237	0.208
C29	0.290	0.261	0.232	0.203
C30	0.281	0.253	0.225	0.197
C31	0.254	0.229	0.204	0.178
C32	0.246	0.222	0.197	0.172
C33	0.223	0.200	0.178	0.156
C34	0.207	0.186	0.166	0.145
C35	0.190	0.171	0.152	0.133
C36	0.184	0.166	0.147	0.129
C37	0.171	0.154	0.137	0.120
C38	0.162	0.145	0.129	0.113
C39	0.152	0.137	0.121	0.106
C40	0.142	0.128	0.114	0.099
C41	0.141	0.127	0.113	0.098
C42	0.130	0.117	0.104	0.091
C43	0.124	0.111	0.099	0.087
C44	0.116	0.104	0.093	0.081
C45	0.111	0.100	0.089	0.078
C46	0.109	0.098	0.087	0.076
C47	0.101	0.091	0.081	0.071
C48	0.096	0.086	0.077	0.067
C49	0.092	0.082	0.073	0.064
C50	0.089	0.080	0.071	0.061
C51	0.086	0.078	0.069	0.060
C52	0.084	0.076	0.067	0.059

Fig. 7 Comparison of Frequency to Damage Level (C27~C52)

Length는 케이블의 길이를 의미한다. 현이론에 의한 고유진동수변화가 제안방법에 의한 고유진동수보다 케이블의 길이에 대해 더 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 현이론에 의하면 케이블길이가 작을수록 고유진동수는 크게 나타난다.

Table 5 Comparison of Natural Frequency by Vibration Direction

Cable ID	String Theory	Present Method	$\frac{Transverse}{Longitudinal}$
	Transverse Frequency (Hz)	Longitudinal Frequency (Hz)	
C27	1.137	0.347	3.274
C28	0.984	0.297	3.313
C29	0.857	0.290	2.950
C30	0.790	0.281	2.809
C31	0.752	0.254	2.954
C32	0.686	0.246	2.788
C33	0.678	0.223	3.042
C34	0.616	0.207	2.974
C35	0.617	0.190	3.241
C36	0.546	0.184	2.967
C37	0.551	0.171	3.226
C38	0.492	0.162	3.045
C39	0.482	0.152	3.174
C40	0.453	0.142	3.183
C41	0.425	0.141	3.020
C42	0.403	0.130	3.103
C43	0.392	0.124	3.161
C44	0.367	0.116	3.163
C45	0.359	0.111	3.226
C46	0.337	0.109	3.091
C47	0.333	0.101	3.289
C48	0.310	0.096	3.230
C49	0.297	0.092	3.245
C50	0.286	0.089	3.226
C51	0.276	0.086	3.199
C52	0.267	0.084	3.177

Fig. 8 Comparison of Frequency to Cord Length

4. 결 론

이 연구에서는 사장교 케이블의 손상과 고유진동수와의 상관관계 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존 손상추정방법에 대비하여 간편한 방법을 사용하여 손상된 케이블의 고유진동수를 도출, 확인함으로써 케이블구조시스템의 손상여부 및 수준을 정량적으로 예측하는 근사모델을 제안하였다.
- (2) 케이블의 단면손상률이 증가할 경우 단면적이 감소되어 강성이 작아지므로 고유진동수는 작아지는 데 이 연구에서는 직선에 근접하게 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 손상률이 매 10% 증가시 고유진동수는 약 10%~13% 정도 감소한다.
- (3) 기존 현이론에 의한 고유진동수 대비 제안방법에 의한 고유진동수의 비는 약 2.788배~3.313배로 나타났다.
- (4) 케이블의 고유진동수에 대해서 환경적 요인 및 하중효과에 대한 영향은 손상에 의한 영향보다 상대적으로 크지 않아 고려하지 않았으며 향후 환경적 요인, 하중효과 및 손상을 동시에 고려하여 케이블의 고유진동수에 대한 추가연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 인천대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

References

1. Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J., and Stone, B. J. (1978), A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20(2), 93-100.
2. Expressway & Transportation Research Institute (2011), Development of Monitoring-Based Maintenance Systems for Cable-Supported Bridges, Korea Expressway Corporation, 1-114.
3. Frederick A, J. A. (1997), Damage Detection Based on the Geometric Interpretation of the Eigenvalue Problem, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
4. Kim, H. K., Hwang, J. W., and Lee, M. J. (2008), Fundamental Frequency Extraction of Stay Cable based on Energy Equation, *Journal of KSCE*, KSCE, 28(1A), 125-134.
5. Kim, J. T., Ryu, Y. S., Cho, H. M., and Stubbs, N. (2003), Damage Identification in Beam-type Structures : Frequency-based Method vs. Mode-shape-based Method, *Engineering Structure* 25, 55-67.
6. Korea Expressway Corporation (2010), Incheon Bridge Construction Note, 86-153.
7. MIDAS IT (2012), Analysis Reference, MIDAS Information Technology Co., Ltd, 160-170.
8. Nam, S. J., and Yhim, S. S. (2014), Evaluation of Tension of Stay Cable using MBM (Measurement-based Model),

-
- Journal of KSMI*, KSMI, 18(3), 93-100.
9. Sundermeyer, J. N., and Weaver, R. L. (1993), On Crack Identification and Characterization in Beam by Nonlinear Vibration Analysis, TAM Report No.74, UILU-ENG-93-604, Univ. of Illinois.

Received : 10/16/2014
Revised : 10/30/2014
Accepted : 11/10/2014

요 지

사장교 케이블의 손상은 사장교 전체의 안전에 가장 큰 영향을 주는 요인이 되므로 케이블의 손상에 대한 유지관리를 필수적으로 해야 한다. 이러한 유지관리의 대표적인 방법으로 케이블의 고유진동수변화를 추적하는 방법이 있다. 지금까지 케이블의 고유진동수는 진동법에 의해 횡방향 진동으로 추정하여 왔으며 시스템인식기법은 반복법에 의한 민감도방정식으로 축방향강성을 추정하나 새그의 영향으로 종방향운동에 대한 고유진동수의 분포에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 종방향운동에 의한 고유진동수를 이용하여 손상을 추정함으로써, 종방향운동의 신뢰성을 향상시키는 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법의 적용결과를 근사해인 유한요소해석결과와 비교하여 유사한 결과를 얻음으로써 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다. 따라서, 케이블손상과 고유진동수와의 관계를 분석한 결과는 손상률이 증가할수록 고유진동수는 낮게 나타났다. 따라서 케이블의 실측 고유진동수를 알 때 케이블손상과 고유진동수와의 관계식을 통해 케이블의 손상정도를 추정할 수 있으므로 케이블의 효율적인 유지관리가 가능하게 된다.

핵심 용어 : 케이블 손상, 손상크기, 고유진동수 분포, 축강성