

교량 케이블시스템의 모드변수에 관한 연구

이현철^{1*}, 조영훈², 김진수³, 박경호⁴

A Study on the Modal Parameters for Cable System of Bridge

Hyunchol Lee^{1*}, Yeong-hoon Jo², Jinsoo Kim³, Kyoungho Park⁴

Abstract : In recent years, the type of bridge where cables such as suspension bridge and cable-stayed bridge are the main factors in the construction of long-range bridges has been soaring. The effects of cables on these structures are very large, and for structural analysis, it is necessary to study the cable and the structural changes according to the mode characteristics of the cables. In particular, cables are directly connected to camber adjustment, which conveys load effects on girders to tower, and are important components in the overall structure, and since the initial tension on the construction is compared with the tension over time, this study was conducted to help identify the condition of the bridge's aging and abnormalities. Therefore, in this study, the characteristics of the mode from the mode analysis through the impact hammer to the mass of the cable and the change in the length of the cable are analyzed.

Keywords: Cable, Frequency Response Function, Stabilization Chart, Mode Complexity, Mode Assurance Criteria

1. 서 론

최근 들어 장대교량의 건설에 현수교, 사장교 등과 같은 케이블이 주 요소인 교량 형식이 급증하고 있다. 이와 같은 구조물에서 케이블이 미치는 영향은 매우 크며, 케이블의 모드 특성이 전체 구조계에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. 케이블은 거더에 가해지는 하중효과를 주탑으로 전달하는 캠버조절과 직결되고 전체 구조에서 중요한 부재로서, 가설시 가해지는 초기 장력과 시간이 지난 후 장력을 비교함으로써 교량의 노후상태와 이상을 점검 할 수 있다(Choi, 1988). Chlko(1996) 등은 모드 해석에 사용하는 커브피팅(Curve fitting)을 새로운 Direct Simultaneous Modal Approximation(DSMA) 방법으로 적용하여 고유진동수와 고유벡터의 신뢰성을 높이고자 전체 모드에 비선형 함수를 최소화 하여 모달 매개변수의 신뢰성을 검토하였다.

Cornwell et al (1999) 과 Elliott et al (1998) 등은 실내 모드 해석으로 변수가 많은 장대 구조물을 가상실험 모달해석으로 모드 특성을 비교하여 최적의 센서위치에 의한 신뢰성과 교량의 진동특성을 측정하기 위해서 다수의 연구 방법을 제안하

고 모드특성을 제시하였다. 그리고 Shwarz(2001) 등은 다수의 채널을 이용하여 시간영역의 진동응답을 측정하고자 Z24 고속도로에 2개의 가진실험(Shaker Test), 충격해머실험(Impact Hammer Test)와 상시진동실험(Ambient Vibration Test)을 적용한 FRF와 ODS FRF(Frequency Response Function)을 커브 피팅 과정으로 얻은 모드 매개변수와 MAC(Modal Assurance Criterion)을 통해 실험방법을 비교분석하였다.

상기와 같이 기존 연구에서는 구조물 전체에 대한 모드해석을 수행하여 구조물의 손상을 검색하거나 공진을 유발하는 요인 및 구조물의 경계조건에 대한 연구가 주류를 이루었다. 연구대상 구조물은 케이블교량이 아닌 일반교량이었다. 기존 연구내용으로부터 구조물 전체에서 주요부재에 해당하는 케이블의 모드특성을 상세하게 파악하는 데에는 한계가 있었고 본 연구에서는 케이블교량에서 주요부재인 케이블에 대해서 충격 해머를 이용하여 케이블의 배치방법에 따른 영향 등을 파악하고자 경사각이 상이한 케이블로 연구방법을 적용하여 충격에 따른 모드변수별 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

모드해석은 구조물의 개선과 모드특성을 나타내기 위해 기계 및 항공 분야에 제한되지 않고, 토목 분야로 확대되어 연구되고 있다. 특히 장대 구조물의 경우 풍하중 및 지진 등의 영향에 의해 발생하는 진동에 의한 동적거동을 파악하는 연구가

¹정희원, (주)구주엔지니어링 기업부설연구소 연구소장

²정희원, (주)구주엔지니어링 기업부설연구소 주임연구원

³정희원, (주)구주엔지니어링 기업부설연구소 연구원

⁴정희원, (주)구주엔지니어링 토목기술부 연구원

*Corresponding author: lhc0414@chol.com

Chief Technology Officer, Research Institute, Guju Engineering Inc.

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 10월 1일까지 학회에 보내주시면 2019년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

다수 진행되고 있다. 모드해석은 해석 및 실험과정을 통해 모드 매개변수를 추정하며 구조물의 모드 특성으로 반영한다. 이로 인해 구조물의 유지관리에 있어서 모드특성은 가볍고 유연하면서 견고하기 위한 주요인자로 적용된다.

주로 구조물의 동적거동에 대한 타당성을 확인하기 위해 수치해석 방법으로 유한요소해석을 사용하지만 결과의 정확도가 높다고 판단할 수는 없다. 실제 구조물의 경우 재료특성을 비롯한 지지조건이나 접합 상태 등의 예측할 수 없는 변수가 발생되기 때문에 수치적 해석방법과 병행하여 실험적 해석방법을 이용한 상호검증과 보완이 필요하다(Hwang, 2009).

2.1 충격해머실험(Impact Hammer Test)

충격해머실험에 적용되는 장비는 충격해머(Impact hammer)라고 불리며 가진실험(Shaker Test)에 비해 질량에 의해 발생하는 문제점이 없고, 실험이 비교적 용이하여 널리 사용되는 실험 방법이다. 충격해머실험은 가진력의 한계로 비교적 소규모 구조물의 진동시험에 자주 사용된다. 가장 일반적인 실험 방법으로 가진 위치를 바꿔 가면서 가속도 고정으로 단자유도(위치와 방향)를 측정하는 방법과 가진위치를 고정으로 다자유도를 측정하는 실험방법이 있다(Hwang, 2009).

충격해머는 끝단부에 로드셀(Loadcell)이 부착되어 충격의 가진 하중을 측정한다. 충격해머의 무게와 타격속도에 비례한 크기를 가지며 해머팁(Tip)의 종류에 따라 주파수범위가 결정되고 단단할수록 고주파수 범위를 가지므로 해머팁의 선택이 중요하다. 또한 충격해머실험시 충격가진에 의한 가속도계로부터 측정된 응답은 0으로 없어지지 않는다.

이런 경우 누설이 발생하며 이를 최소화하는 방법으로 지수 창(Exponential Window)을 적용한다. 이것은 데이터로 하여금 푸리에 변환과정(Fourier Transform)의 주기성 요구조건을 더욱 만족시키기 위해 사용한다(Hwang, 2009).

실험에 사용된 데이터수집장치는 NI사의 NI9234를 적용하였으며 모드해석 소프트웨어는 ModalVIEW Single Seat를 이용하였다.

2.2 케이블교량 축소 모형

케이블의 모드변수를 파악하고자 Fig. 1과 같이 케이블에 인장력을 도입하고 케이블을 거치할 수 있는 축소모형을 제작하였다. 축소 모형은 총 2개이며, 모형에 사용된 강재는 H-250×250×9×14이다. H형강의 접합방법은 7-100×100×7을 사용하여 볼트접합으로 H형강을 연결하였다. Fig. 1은 H형강으로 제작한 케이블거치 축소모형을 나타내었다. Fig. 2는 수평방향 케이블설치 사진이다.

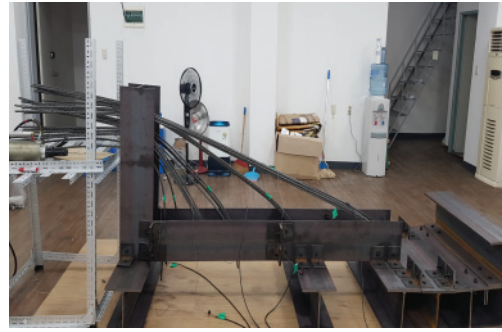


Fig. 1 Laboratory Model Overview Diagram



Fig. 2 Horizontal Model Diagram

2.3 실험 케이블 및 장력도입장치

대상 실험체에 설치된 케이블은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 의 강연선으로서 케이블의 단면은 7연선으로 외측에 6개의 소선이 있고 그 중앙에 1개의 심선이 위치해있는 형태이다. Table 1은 케이블의 제원을 나타내었고, Fig. 3은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 케이블의 단면도를 나타내었다. 케이블에 인장력을 도입하기 위하여 사용된 유압실린더 및 유압펌프를 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1 Cable Specification

Division	Specifications
Diameter	$\varnothing 12.7\text{mm}$
Area	98.71 mm^2
Modulus of Elasticity	200,000 MPa



Fig. 3 Cable Cross Section



Fig. 4 Hydraulic Cylinder

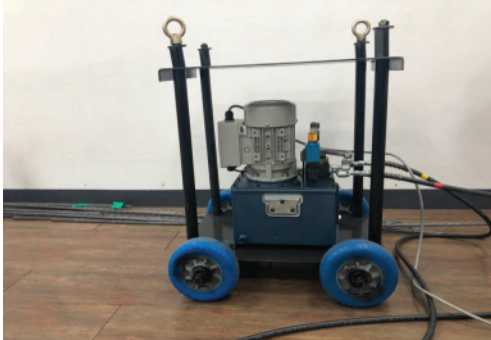


Fig. 5 Hydraulic Pump

2.4 Impact Hammer

PCB사의 086D05 모델로서 해머의 특성은 측정 결과에 영향을 주지 않는다. 이는 실험 데이터가 손상되지 않도록 관심 주파수 범위의 해머 공진기를 제거하여 보다 정확하고 일관된 측정을 수행 할 수 있다. Table 2은 Impact Hammer의 제원을 나타내고 Fig. 6은 Impact Hammer의 사진을 나타내었다. 케이블의 관심주파수가 200Hz이상이므로 해머의 Tip을 적용

Table 2 Impact Hammer Specification

Division	Specifications
Sensitivity($\pm 15\%$)	0.23 mV/N
Measurement Range	± 22240 N pk
Resonant Frequency	≥ 22 kHz



Fig. 6 Impact Hammer

함에 있어서 케이블의 관심주파수를 벗어난 해머의 Tip을 실험에 사용하였다.

2.5 가속도계 및 하드웨어

PCB사의 ICP(IEPE) 타입의 정밀형 1축 가속도계로서 케이블의 모드특성을 산출하기 위해 사용하였다. Table 3는 가속도계에 대한 기술적 사양, Fig. 7는 가속도계의 사진을 나타내고 있다. Fig. 11은 가속도계의 설치위치를 나타내며 케이블의 길이를 4등분하여 케이블의 진폭이 가장 큰 중앙부분과 케이블길이의 1/4지점 및 3/4지점에 가속도계를 설치하여 실험을 수행하였다. 하드웨어는 NI사의 NI 9234 모델로서 본 연구에서는 케이블의 모드특성을 산출하기 위해 사용된다. Fig. 8는 하드웨어 사진이다.

Table 3 Accelerometer Specification

Division	Specifications
Sensitivity($\pm 15\%$)	1.02 mV/(m/s ²)
Measurement Range	± 4900 m/s ² pk
Frequency Range	0.5 to 10000 Hz



Fig. 7 Accelerometer(PCB352C03)



Fig. 8 Data Acquisition System

2.6 실험개요

본 실험은 Impact Hammer를 이용하여 측정하는 진동실험으로 수행되었다. 제작된 강연선 케이블 거치대에 케이블을 설치하고 소정의 장력을 가한 후, 케이블에 1축 가속도계를 부착

하고 Impact Hammer를 통하여 진동을 가하면서 실험을 진행하였다. 실험은 총 22회로 케이블의 설치각도별(0°, 20°~ 70°; 매10°마다), 케이블의 단면적별(1×∅12.7mm, 2×∅12.7mm, 3×∅12.7mm, 4×∅12.7mm, 5×∅12.7mm) 순으로 진행되었다. 실험체의 주요변수는 케이블의 길이, 케이블의 설치각도, 케이블의 단면적이다. 케이블의 길이는 주탑측에서 가장 가까운 케이블이 0.53m이며 주탑측에서 가장 멀리 있는 케이블이 2.1m이다. 케이블의 설치각도는 주탑측에서 가장 가까운 케이블의 설치각도가 70°이고 주탑측에서 가장 멀리 있는 케이블의 설치각도가 20°이다. 케이블의 단면적은 ∅12.7mm인 강선이 1개인 경우부터 ∅12.7mm인 강선이 5개까지 1개씩 점차 증가시켜서 케이블의 구성하였다. 실험체의 주요변수로 케이블의 길이, 케이블의 단면적, 케이블의 설치각도를 산정한 근거는 케이블의 모드해석에서 케이블의 길이, 단면적 등이 고유진동수 등의 동적특성에 영향을 미치기 때문이다. 실험으로부터 얻어진 결과데이터를 모드해석 소프트웨어인 ModalVIEW R2를 통하여 분석을 실시하였다(ABSIGNAL, 2012). 모드 분석의 방법에 대해서 측정타입은 FRF-EMA으로서 구조물에 가진력과 구조물의 진동응답으로부터 FRF를 계산한다. 윈도우의 타입은 Hanning을 적용하였다. 또한 FRF의 산정시 노이즈의 영향을 고려하였다. 데이터 수집은 NI9234 하드웨어를 적용하였다. FRF 결과로부터 모드안정차트, 모드복합성 및 모드상관계수 등을 구하여 모드평가를 실시하였다. 모드실험의 전체적인 과정은 구조물의 모델링, 구조물에 부착된 센서로부터 데이터 수집, 모드해석, 해석결과분석 순으로 이루어진다. 고유진동수는 퓨리에변환을 이용하여 Peak Picking Method를 이용하여 산정하고 감쇠비는 3dB Method를 적용하였다. 여기서 3dB Method를 식으로 나타내면 다음 Eq.(1)과 같다.

$$Damping\ ratio(\%) = \frac{f_0}{f_1 - f_2} \quad (1)$$

여기서 f_0 는 공진주파수, f_1 는 공진주파수보다 작은 주파수로서 3dB 낮은 주파수, f_2 는 공진주파수보다 큰 주파수로서 3dB 낮은 주파수이다.

Fig. 9~ Fig.10는 실험구성에 대한 도면을 나타내었다. Fig. 9에서 최외측 케이블의 길이가 2.1m로서 케이블이 주탑측으로 갈수록 케이블의 길이가 작아지며 케이블의 경사각이 커지는 경향을 모사하였고, 주탑 및 보강형을 H-BEAM으로 모사하였다. 실제 사장교의 외측케이블의 연장이 100m라고 하면 실제 사장교 크기의 축소비 50을 적용하면 주탑측에 가장 가까운 케이블의 연장은 27m로서 케이블 규모는 실제 사장교의 케이블 배치형상을 따라 모사하였고 케이블이 보강형과 접하는 정착부의 위치도 주탑측에서 측정간방향으로 갈수록 정

착부의 설치간격이 크도록 정착부의 위치를 선정하였다. 케이블과 주탑, 케이블과 보강형의 경계조건은 고정으로 가정하여 실험시 정착부는 고정단으로서 작용하도록 상세도에 따라 시험체를 제작하였다. Fig. 9에서 가속도계의 설치위치를 나타내며 케이블의 길이를 4등분하여 케이블의 진폭이 가장

Table 4 Cable Install Dimension

Division	Length	Angle
Cable N0	1.250m	0°
Cable N1	2.100m	20°
Cable N2	1.440m	30°
Cable N3	0.950m	40°
Cable N4	0.800m	50°
Cable N5	0.580m	60°
Cable N6	0.530m	70°

Table 5 Cable Tension Ratio for Allowable Tension

Division	Tension (kN)	Test Tension / Allowable Tension (%)
Cable N0	20.148	12.193%
Cable N1	9.079	5.494%
Cable N2	16.035	9.704%
Cable N3	13.458	8.144%
Cable N4	14.282	8.643%
Cable N5	9.658	5.845%
Cable N6	8.884	5.376%

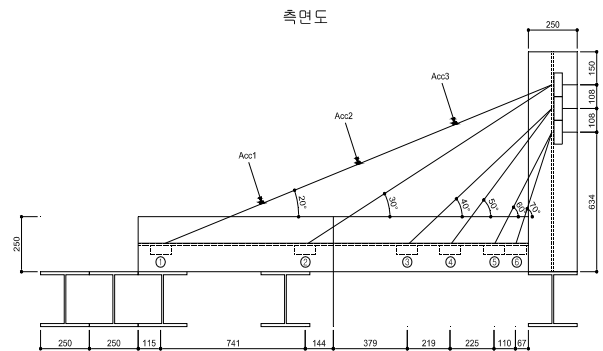


Fig. 9 Experimental Schematic view

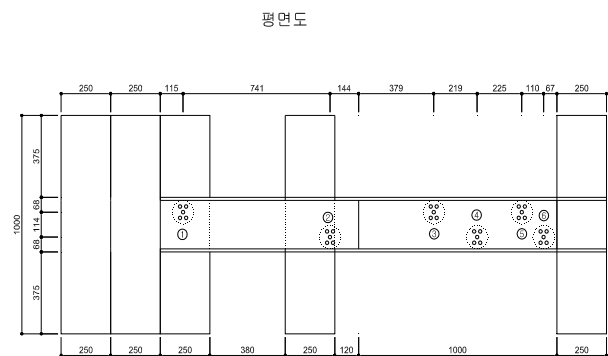


Fig. 10 Experimental dimension

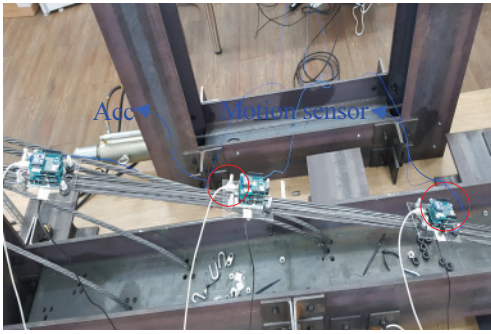


Fig. 11 Experimental Photograph ; Inclined Cable

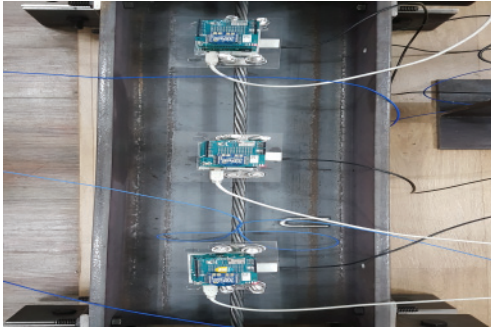


Fig. 12 Experimental Photograph ; Horizontal Cable

큰 중앙부분과 케이블길이의 1/4지점 및 3/4지점에 가속도계를 설치하여 케이블진동에 대한 계측방향은 면내진동이 되도록 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 케이블의 현황은 Table 4과 같다. 또한, 각 케이블에 도입된 장력과 최대장력에 대한 비율을 Table 5에 나타내었다.

3. 실내실험

3.1 케이블의 FRF 결과

Fig. 13~19은 각 실험 case 별 모드평가를 실시하여 FRF결과를 나타낸 것이다. FRF는 다음 Eq.(2)과 같이 전달함수는 입력 힘(X_n)의 라플라스 변환으로부터 응답(Y_n)의 라플라스 변환의 관계로 나타내었다.

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 Y_i 는 자유도 i에서 응답신호 스펙트럼이다. X_j 는 자

유도 j에서 가진신호 스펙트럼이다. H_{ij} 는 자유도 i와 j 사이에 FRF이다.

Table 6에서 케이블의 FRF 결과를 나타내었다. Fig.13 ~ Fig.19로부터 기존 FRF가 중첩된 FRF와 거의 일치하므로 모드평가가 정확하다는 의미이다. Table 6에서 산정된 FRF 결과는 케이블의 질량과 케이블의 길이변화에 따라 케이블의 고유진동수와 댐핑의 변화는 미미한 것으로 나타났으며 고유진동수 최대값은 290.10Hz, 최소값은 276.2Hz로서 최대값은 최소값 대비 1.05배이며, 댐핑의 최대값은 0.150%, 최소값은 0.006%로서 댐핑의 차이는 0.145%에 불과하였다. 이는 실험에 사용된 케이블의 질량이 공용중인 케이블의 질량대비 약 1/12로서 케이블의 고유진동수와 댐핑의 뚜렷한 변화를 나타내는 데에는 제약이 있었다. 주파수응답함수는 외력이 특수

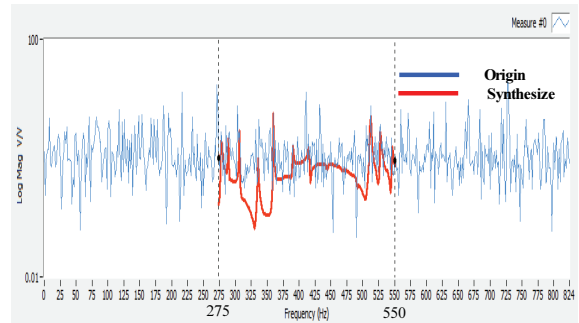


Fig. 13 Comparison of Synthesized FRF and Original FRF(Cable N0)

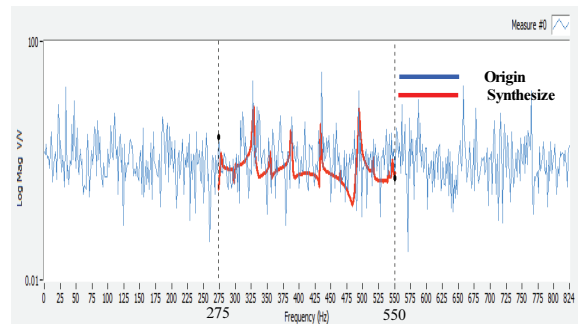


Fig. 14 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N1)

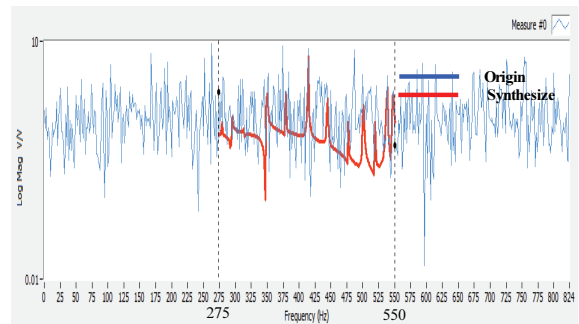


Fig. 15 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N2)

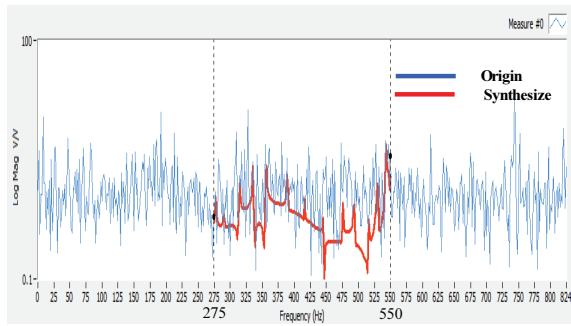


Fig. 16 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N3)

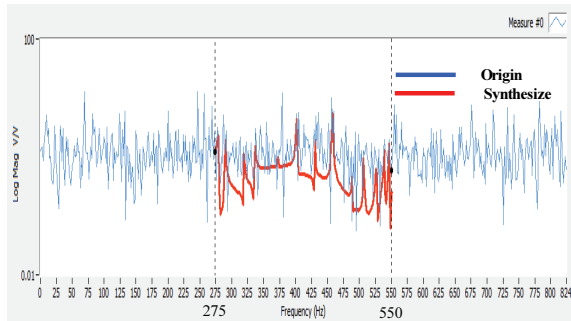


Fig. 17 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N4)

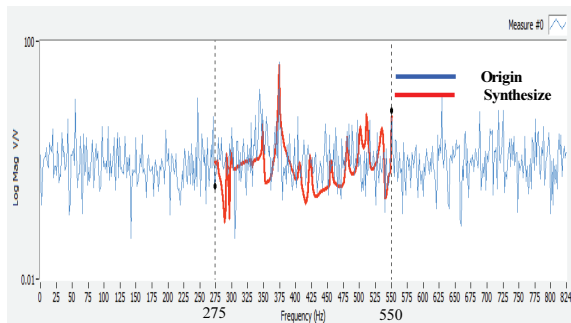


Fig. 18 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N5)

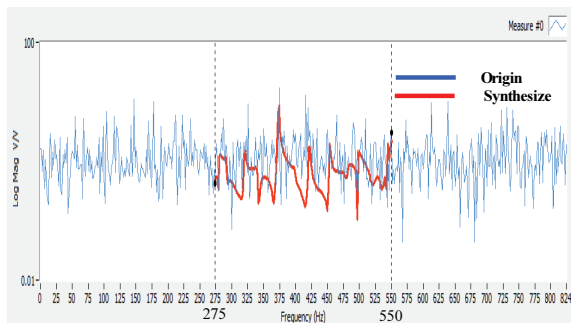


Fig. 19 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N6)

해에 미치는 영향의 정도로서, FRF가 클수록 외력은 시스템의 정상상태에 큰 영향을 미치며, FRF가 작을수록 외력의 영향은 작아진다. 공진이 발생할 시에는 위상각이 90도가 되는

Table 6 Cable FRF Result

Division	Frequency (Hz)	Damping (%)	Cable Area
Cable N0	290.10	0.0163	1×Ø12.7mm
Cable N1	285.20	0.0742	1×Ø12.7mm
	279.60	0.1000	2×Ø12.7mm
	282.00	0.1396	3×Ø12.7mm
	284.50	0.0282	4×Ø12.7mm
	285.50	0.0236	5×Ø12.7mm
Cable N2	281.30	0.0347	1×Ø12.7mm
	279.80	0.1204	2×Ø12.7mm
	276.50	0.0748	3×Ø12.7mm
Cable N3	279.90	0.0406	4×Ø12.7mm
	277.70	0.0323	5×Ø12.7mm
	280.60	0.1260	1×Ø12.7mm
	276.20	0.0505	2×Ø12.7mm
	278.90	0.0611	3×Ø12.7mm
Cable N4	279.00	0.1106	4×Ø12.7mm
	283.60	0.1502	5×Ø12.7mm
	280.80	0.0076	1×Ø12.7mm
	277.50	0.0265	2×Ø12.7mm
Cable N5	279.70	0.0447	3×Ø12.7mm
	280.70	0.0581	4×Ø12.7mm
Cable N5	277.50	0.0165	1×Ø12.7mm
Cable N6	282.40	0.0056	1×Ø12.7mm

것을 알 수 있다. 또한, 감쇠가 클수록 위상각이 커지며 공진의 영향은 줄어든다.

3.2 케이블의 Stabilization Chart 결과

Fig. 20~26에서는 케이블에 대한 Stabilization Chart 결과를 나타내었다. Table 7는 Stabilization Criteria를 나타내었다.

Table 7 Cable Stabilization Criteria

Symbol	Frequency	Damping Ratio	Mode Shape
s	yes	yes	yes
v	yes	no	yes
d	yes	yes	no
f	yes	no	no
o	no	no	no

여기서 Stabilization Criteria는 Frequency stability에 대해서는 1%, Damping stability은 5%, mode Shape stability는 2%를 적용하였다(Jenny et al. 2007). Stabilization Chart는 고유진동수와 댐핑비 및 모드형상에 따라 심별을 부여하여 일정

기준치를 만족하는 경우 yes로 표현하였고, 불만족하는 경우 no로 표시하였다. Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값이 FRF에 의한 고유진동수와 댐핑값보다 크게 나타났다.

Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값의 관계를 다음 Fig. 27에서 나타내었으며 고유진동수가 높은 값을 가질수록 댐핑비는 낮아지는 경향을 나타내었다. Stabilization Chart

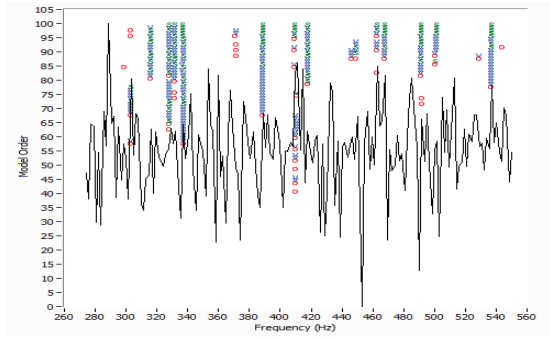


Fig. 20 Stabilization Chart(Cable N0)

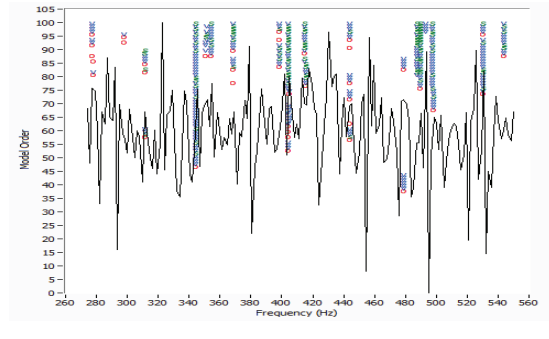


Fig. 24 Stabilization Chart(Cable N4)

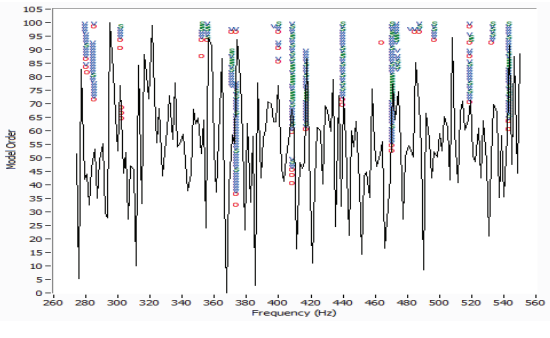


Fig. 21 Stabilization Chart(Cable N1)

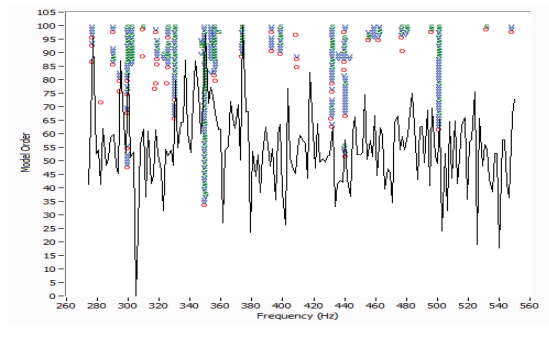


Fig. 25 Stabilization Chart(Cable N5)

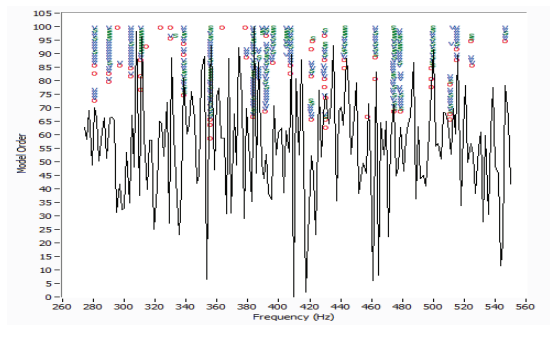


Fig. 22 Stabilization Chart(Cable N2)

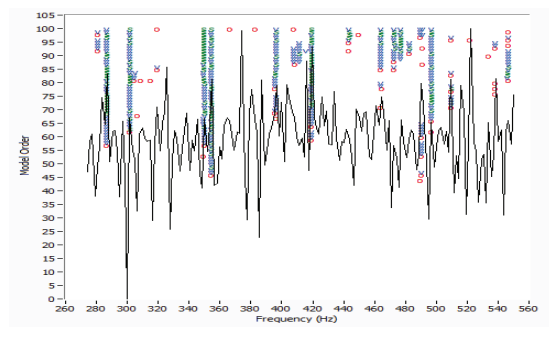


Fig. 26 Stabilization Chart(Cable N6)

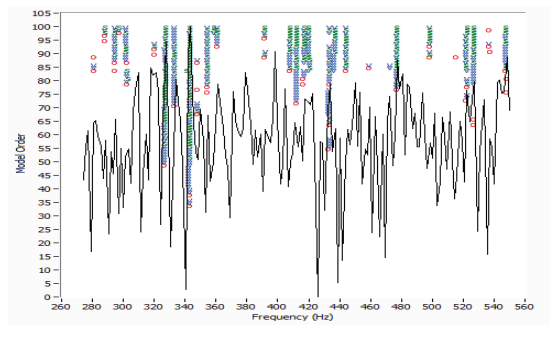


Fig. 23 Stabilization Chart(Cable N3)

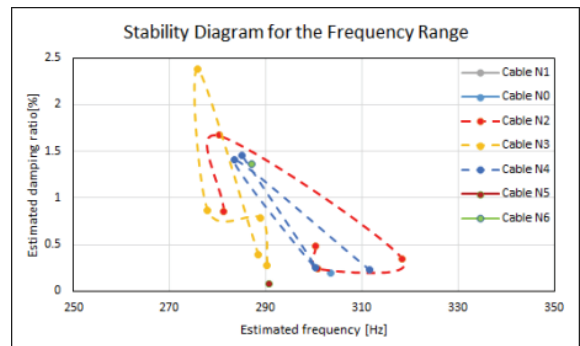


Fig. 27 Stabilization Diagram for the Frequency Range

분석결과 케이블의 고유진동수, 댐핑 및 모드형상의 안정기준을 모두 만족하는 저차모드에서의 고유진동수의 범위는 275.86Hz ~ 318.42Hz이며 댐핑의 범위는 0.085% ~ 2.38% 범위내에 속하였다. 이는 FRF 산정결과로 나타난 고유진동수와 댐핑의 범위와 유사하게 나타났다.

Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값이 FRF에 의한 고유진동수와 댐핑값보다 크게 나타났다.

Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값의 관계를 상기 Fig. 27에서 나타내었다. Table 8에서는 케이블의 Stabilization Chart 결과에서 고유진동수와 댐핑에 대한 값을 나타내었다.

Table 8 Cable Stabilization Chart Result

Division	Frequency (Hz)	Damping (%)	Cable Area
Cable N0	303.39	0.1960	1×∅12.7mm
Cable N1	285.20	1.9300	1×∅12.7mm
	298.61	0.1430	2×∅12.7mm
	292.74	0.1200	3×∅12.7mm
	288.81	1.3100	4×∅12.7mm
Cable N2	285.54	0.1760	5×∅12.7mm
	281.31	0.8570	1×∅12.7mm
	280.31	1.6700	2×∅12.7mm
	318.42	0.3470	3×∅12.7mm
Cable N3	300.75	0.2400	4×∅12.7mm
	300.39	0.4840	5×∅12.7mm
	288.43	0.3900	1×∅12.7mm
	275.86	2.3800	2×∅12.7mm
Cable N4	277.94	0.8630	3×∅12.7mm
	288.90	0.7840	4×∅12.7mm
	290.32	0.2810	5×∅12.7mm
	311.71	0.2260	1×∅12.7mm
Cable N5	283.44	1.4100	2×∅12.7mm
	300.43	0.2500	3×∅12.7mm
	284.99	1.4600	4×∅12.7mm
Cable N6	290.64	0.0845	1×∅12.7mm
Cable N6	287.02	1.3600	1×∅12.7mm

3.3 케이블의 Complexity 결과

모드는 normal mode와 complex mode로 구분되며 normal mode는 모든 자유도의 위상관계가 180°를 이루지만 complex mode는 자유도간의 위상관계가 180°를 이루지 않으며 모드별로 complex mode에 대하여 작도하였다. 특히 모드는 구조물의 댐핑특성에 의하여 결정된다. Fig. 28~33에서는 케이블의 Complexity를 나타내었다. Table 9에서는 케이블의 Complexity 결과에서 위상각에 대한 값을 나타내었다. Fig. 28에서 케이블의 다른 자유도에서 서로간에 위상각과의 관계가 180°도가 되지 않아서 복합모드로 구분된다. Fig. 34에서는 케이블의 위상각에 따른 케이블의 단면적과 케이블의 경사각에 따른 모드해석 결과를 나타내었다. 모드해석결과 선형 구조물에서 모드형상은

댐핑값이 비례하지 않게 분포한다면 구조물의 모드형상은 복합모드로 나타날 수 있다. 대부분의 구조요소는 시간에 따른 댐핑

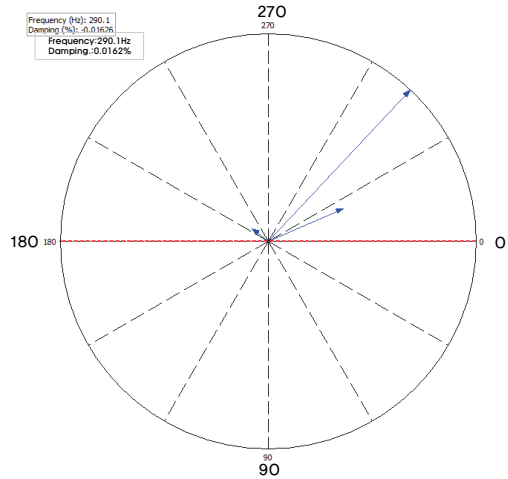


Fig. 28 Complexity Plot(Cable N0)

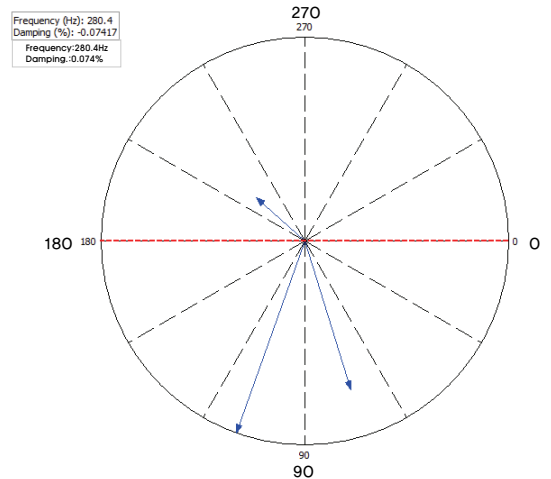


Fig. 29 Complexity Plot(Cable N1)

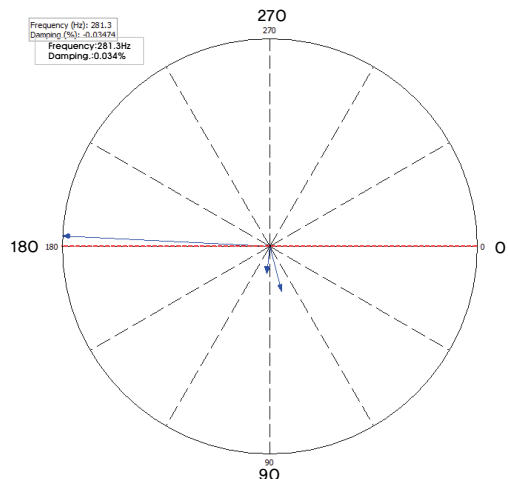


Fig. 30 Complexity Plot(Cable N2)

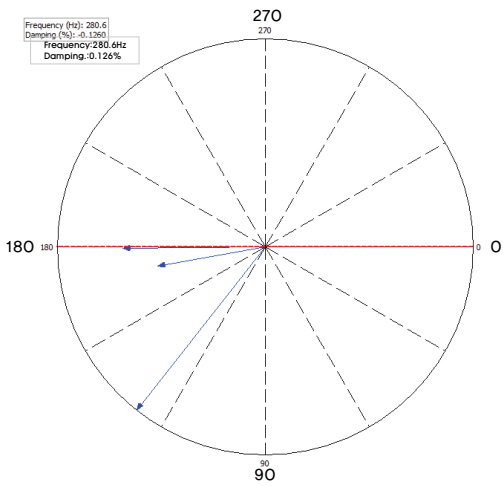


Fig. 31 Complexity Plot(Cable N3)

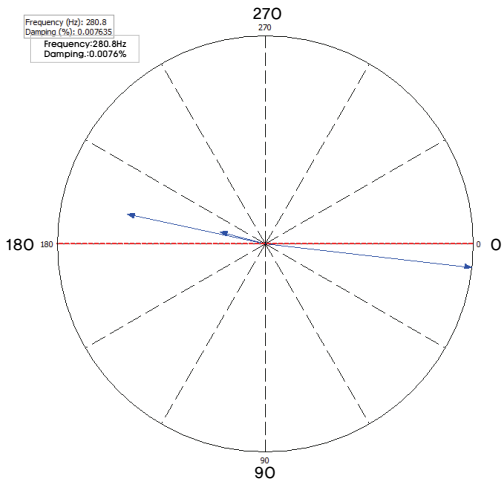


Fig. 32 Complexity Plot(Cable N4)

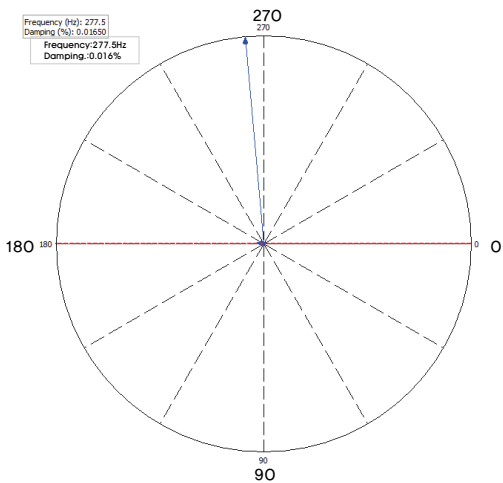


Fig. 33 Complexity Plot(Cable N5)

값은 비례하는 분포를 보이고 있다. 실제구조물에서는 댐핑의 대부분은 연결부에서 비례하지 않은 분포가 집중적으로 나타난다

다. Complexity 분석결과 케이블의 질량증가 및 케이블의 길이에 따라 케이블의 위상각의 변화는 불규칙적으로 나타났으며 그 원인으로서는 실험대상 케이블의 질량이 작을수록 Complexity에 대한 민감도가 떨어진다고 보여진다. 즉, 공용중에 있는 케이블에 대해서 Complexity를 분석하면 위상각의 변화가 뚜렷한 비례관계를 나타낼 것으로 판단된다.

Fig. 34에서는 케이블의 위상각에 따른 케이블의 단면적과 케이블의 경사각에 따른 모드해석 결과를 나타내었다.

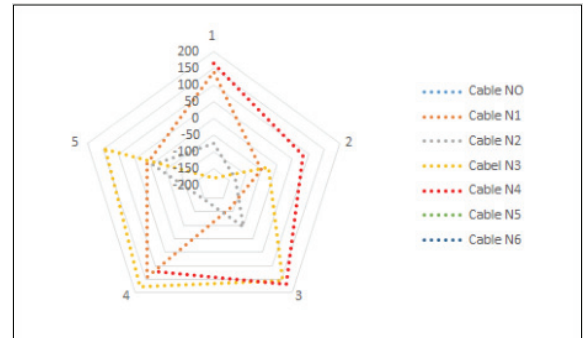


Fig. 34 Complexity Plot(Cables)

Table 9 Cable Complexity Result

Division	Phase(Deg)	Cable Area
Cable N0 Center	46.872	1×Ø12.7mm
	138.365	1×Ø12.7mm
Cable N1 Center	-48.573	2×Ø12.7mm
	-114.257	3×Ø12.7mm
	141.946	4×Ø12.7mm
	11.567	5×Ø12.7mm
Cable N2 Center	-74.985	1×Ø12.7mm
	-133.634	2×Ø12.7mm
	-46.680	3×Ø12.7mm
	-148.198	4×Ø12.7mm
Cable N3 Center	-6.896	5×Ø12.7mm
	-179.549	1×Ø12.7mm
	-25.717	2×Ø12.7mm
	152.673	3×Ø12.7mm
Cable N4 Center	176.659	4×Ø12.7mm
	143.686	5×Ø12.7mm
	165.512	1×Ø12.7mm
	83.232	2×Ø12.7mm
Cable N5 Center	170.084	3×Ø12.7mm
	119.893	4×Ø12.7mm
	95.122	1×Ø12.7mm
Cable N6 Center	-89.092	1×Ø12.7mm

3.4 케이블의 MAC 결과

Modal Assurance Criteria(MAC)는 모드간의 직교성을 나타내며 MAC가 0에 가까우면 선형독립적인 관계를 가지며 1

에 가까우면 선형비례적인 관계를 갖는다. MAC는 상호 비교되는 서로 다른 두 개의 세트에서 해석모드간의 상관관계를 비교 분석하는 방법이다(Shin, 2016). MAC는 다음식 Eq.(3)로 나타내었다.

$$MAC = \frac{|X_i X_j|}{|X_i| |X_j|} \quad (3)$$

여기서 X_i 는 모드형상행렬 $[\phi_{1i} \phi_{2i} \dots \phi_{mi}]$ 의 열벡터이다.

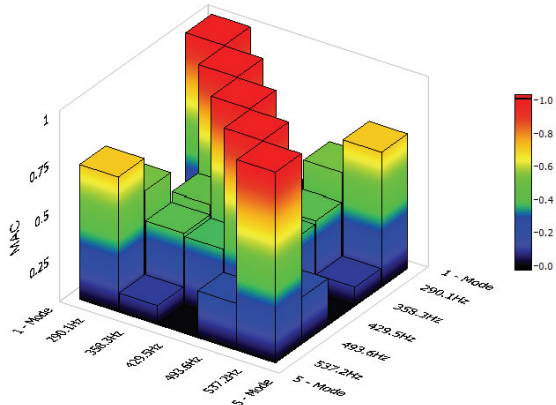


Fig. 35 MAC Plot(Cable N0)

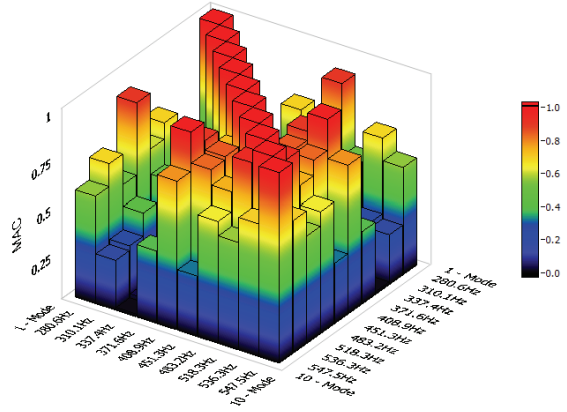


Fig. 38 MAC Plot(Cable N3)

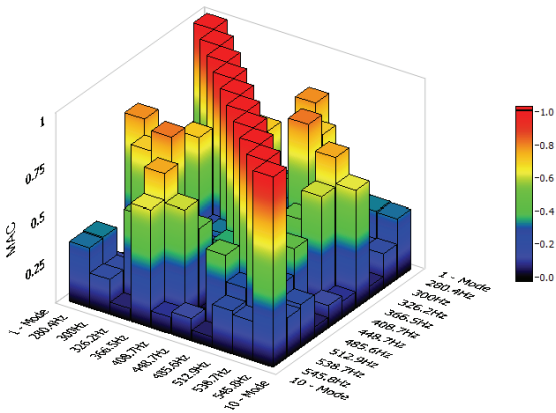


Fig. 36 MAC Plot(Cable N1)

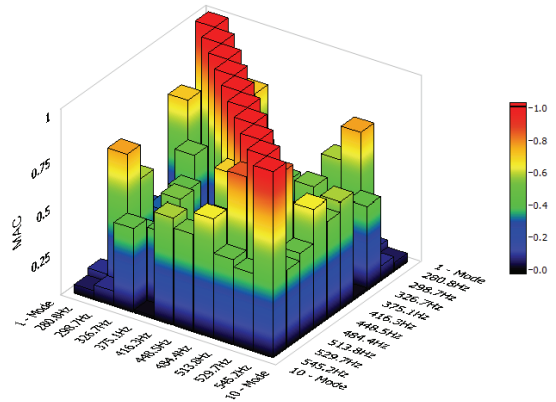


Fig. 39 MAC Plot(Cable N4)

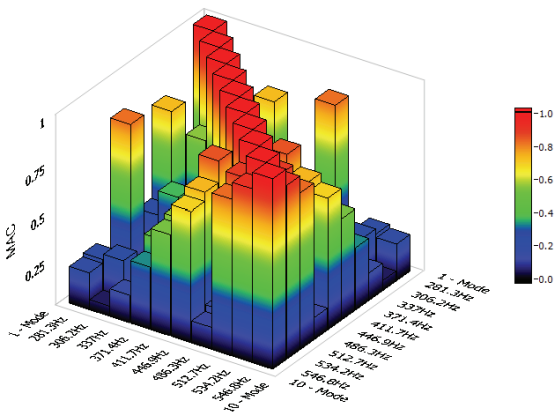


Fig. 37 MAC Plot(Cable N2)

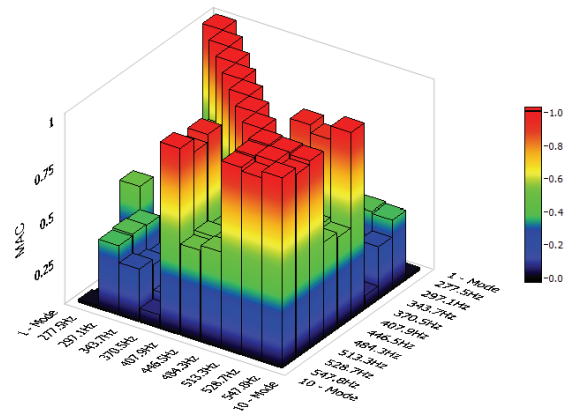


Fig. 40 MAC Plot(Cable N5)

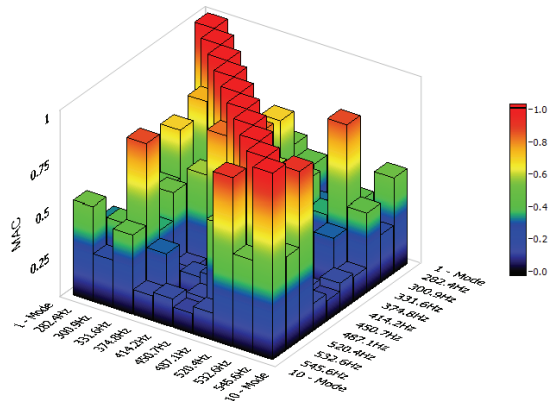


Fig. 41 MAC Plot(Cable N6)

Fig. 35~41에서는 케이블의 MAC값을 나타내었다.

Fig. 35~41에서 모드간의 상관관계를 분석한 결과 대부분의 경우에서 0.9이상의 높은 상관관계를 나타내어 실험 모드간의 분석이 적절한 것으로 나타났다. 또한 Fig. 35~41에서 MAC 분석결과 저차모드에서 케이블의 질량이 클수록 1.0에 가까워지는 경향을 보이고 고차모드에서 0에 근접하는 결과를 나타내었으며 이는 지배모드의 결정이 저차모드에서 이루어지는 것을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 H형강 및 케이블을 사용하여 케이블교량 축소 모형을 제작하고 케이블의 축방향이 수평면과 이루는 각도가 0°, 20°~ 70°(매 10°마다)의 경우로 구분하여 각각의 Case마다 케이블에 대해서 3개의 1축 가속도계와 Impact Hammer를 사용하여 모드해석을 수행하고 모드해석 결과로 케이블의 고유진동수산정, Stabilization Chart, Complexity 및 MAC를 산정하였다. 상기의 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) FRF 산정결과 케이블의 질량과 케이블의 길이변화에 따라 케이블의 고유진동수와 댐핑의 변화는 미미한 것으로 나타났으며 고유진동수 최대값은 290.10Hz, 최소값은 276.2Hz로서 최대값은 최소값 대비 1.05배이며, 댐핑의 최대값은 0.150%, 최소값은 0.006%로서 댐핑의 차이는 0.145%에 불과하였다. 이는 실험에 사용된 케이블의 질량이 공용중인 케이블의 질량대비 약 1/12로서 케이블의 고유진동수와 댐핑의 뚜렷한 변화를 나타내는 데에는 제약이 있었다.
- 2) Stabilization Chart 분석결과 케이블의 고유진동수, 댐핑

및 모드형상의 안정기준을 모두 만족하는 저차모드에서의 고유진동수의 범위는 275.86Hz~ 318.42Hz이며 댐핑의 범위는 0.085%~ 2.38%범위내에 속하였다. 이는 FRF 산정결과로 나타난 고유진동수와 댐핑의 범위와 유사하게 나타나서 Stabilization Chart 분석은 적절한 것으로 판단된다.

- 3) Complexity 분석결과 케이블의 질량증가 및 케이블의 길이에 따라 케이블의 위상각의 변화는 불규칙적으로 나타났으며 그 원인으로서는 실험대상 케이블의 질량이 작을수록 Complexity에 대한 민감도가 떨어진다고 보여진다. 즉, 공용중에 있는 케이블에 대해서 Complexity를 분석하면 위상각의 변화가 뚜렷한 비례관계를 나타낼 것으로 판단된다.
- 4) MAC 분석결과 저차모드에서 케이블의 질량이 클수록 1.0에 가까워지는 경향을 보이고 고차모드에서 0에 근접하는 결과를 나타내었으며 이는 곧 지배모드의 결정이 저차모드에서 이루어지는 것을 나타낸다.

감사의 글

본 연구결과는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 2018년도 국토교통기술촉진연구사업 (연구과제번호 18CTAP-C143274-01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Chlko, T. J., Haritos, N. and Gershkovich, V.(1996), Non-linear curve fitting for modal analysis, Environmental Software, Vol 11, 9-18.
2. Cornwell, P., Farrar, C. R., Doebling, S. W. and Sohn H. (1999) Environmental Variability of Modal Properties, Experimental Techniques, Vol. 23, 45-48.
3. Elliott, A. S. and Richardson, M. H. (1998), Virtual Experimental Modal Analysis(VEMA), Proceeding of 16th IMAC.
4. Jenny Lau, Jeroen Lanslots, Bart Peeters, Herman Van der Auweraer. (2007), Automatic modal analysis: reality or myths.
5. Jeong-In Shin. (2016), Damage Detection In Braced Steel Frame using Modal Analysis.
6. Jun-Kyu Choi. (1998), Measurement of Cable Tension Force by Vibration Method.
7. Min-Gyu Hwang. (2009), The Evaluation of Structural Performance of Braced Plate Girder Using Experimental Modal Analysis.
8. Shwarz, B. and Richardson, M. (2001), Modal Parameter estimation from ambient response data, Proceeding of 19th IMAC.
9. ABSignal, (2012) ModalVIEW – Operating Tutorial Version R2, 1-199 (Web : www.absignal.com)

요 지 : 최근 들어 장대교량의 건설에 현수교, 사장교 등과 같은 케이블이 주 요소인 교량 형식이 급증하고 있다. 이와 같은 구조물에서 케이블이 미치는 영향은 매우 크며, 구조해석을 위해서 케이블에 대한 연구 및 케이블의 모드 특성에 따른 구조계의 변화를 연구해 볼 필요가 있다. 특히, 케이블은 거더에 가해지는 하중효과를 주탑으로 전달하는 캠버조절과 직결되고 전체 구조에서 중요한 부재로서, 가설시 가해지는 초기 장력과 시간이 경과후 장력을 비교하므로써 교량의 노후상태와 이상유무를 파악하는 데 기여하고자 본 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 충격해머를 통한 모드 해석으로부터 케이블의 질량과 케이블의 길이변화에 따른 모드의 특성을 파악할 수 있었고, 공용중에 있는 케이블에서는 위상각의 변화가 비례관계임을 확인하였다. 또한 저차모드에서 지배모드가 결정되는 특성을 MAC분석을 통하여 알 수 있었다.

핵심용어 : 케이블, 주파수응답함수, 안정차트, 모드 복합성, 모드상관계수
