현수교의 기하학적 비선형을 고려한 동적 및 시공단계별 解析

Geometrically Nonlinear Dynamic Analysis of Suspension Bridges Considering Construction Sequences

방 명 석*

Myung-Suk Bang

(1999년 10월 8일 접수, 1999년 11월 19일 채택)

ABSTRACT

Dynamic structural behavior in long span bridges, especially cable structures, is very sophisticated due to their flexibility and structural members are sequentially erected in each construction step. In this study, the consistent mass matrix for dynamic analysis is formulated and computational program considering construction sequences is developed where structural members can be builded or removed by command language and automatically reanalyzed in the moment when structural system is changed. The dynamic analysis, i.e. eigenvalue and time series analysis and the geometrically nonlinear analysis considering construction sequence are conducted to the Namhae Bridge. The analytical results are satisfactory compared with measuring values and the developed computational program can successfully be applied to design and safety check.

1. 서 론

국내 교량기술의 여러 분야에서 아직도 선진 외국의 기술수준에 못 미치고 있으나 그 중에서도 대표적인 분야가 장대교량분야이다. 특히 현수교와 사장교의 설계·시공·안전진단 기술은 선진국에 비해서 크게 낙후되어 있으며 외국에 기술의존도가 매우 높은 실정이다. 과거에 건설된 남해대교나 진도대교, 돌산대교의 경우보다 최근에 건설되고 있는 서해대교, 영종대교, 광안대교의 경우에 외국기술의 의존도가 크게 줄어든 것은 사실이지만 아직도 핵심적인 기술은 외국기술에 의존하고 있는 실정이다. 이는 이 분야에 대한 지속적인 연구가 미흡했기 때문이기도

* 충주대학교 안전공학과

하지만 국내의 수요가 매우 한정되어 있어서 기술개발의 필요성이 크지 않았기 때문이기도 하다. 최근에 장대교량의 건설이 증가하면서 시공중 안전성에 대한 관심이 대두되고 있다. 국내의 경우에도 1991년 경기도 팔당대교가 공사 중 바람의 영향으로 붕괴되였고, 1992년에는 서울의 신행주대교가 공사 중에 붕괴되어 다행히 인명피해는 없었으나 막대한 재산피해를 발생시켰다. 이 두 사고에서 알 수 있는 것은 사장교나 현수교와 같이 장경간 교량의 경우에는 완성시보다 시공 중에 구조적으로 훨씬 취약함을 알 수 있다. 그러나 이러한 교량의 설계나 시공시에는 완성된 구조물을 기본으로 모델링하고 해석만 할 뿐 시공단계별 구조물별로 구조해석이나 안전성검토는 일반적으로 실시하지 않는다. 이 이유는 수많은 시공단계마다 재해석을 해야 하는 것이 수많은 반복 모델링을 요구하고 그 결과의 분석도 매우 어렵기 때문이다. 그러나 위의 두 사고에서 보듯이 장대교량의 시공중에 설계풍속 이하의 바람에 의하여 붕괴하거나, 시공장비·가설재 등이 안전도 검토 없이 반입되어 시공 중 구조물에 과하중이 작용하여 교량이 붕괴되는 것 등은 시공 중 구조물에 대한 안전성 검토가 필수적임을 보여 주고 있다.

최근에 대표적인 연구성과로는 삼차원탄성현수선요소를 이용한 현수교의 해석법에 대한 연구[2~4]가 있다. 본 논문에서는 삼차원 탄성 현수선요소를 이용한 현수교의 비선형해석연구[3]의 연장선상에서, 현수교의 기하학적 비선형해석과 동적해석을 할 수 있는 프로그램을 개발하고 실제구조물에 대한 해석치와 측정치에 대한 전반적인 비교검토를 체계적으로 수행하였다.. 또한 수많은 시공단계를 자동으로 모델링하고 해석할 수 있는 3차원 연결절점요소를 유도하고, 이 요소를 임의로 추가하거나 제거할 수 있는 기능을 개발함으로서 구조물의 건설이나 해체를 단계별로 모델링하고 해석할 수 있는 프로그램을 개발하고 검증하고자 한다.

2. 해석 방법

2.1 3차원 탄성현수선 케이블요소(elastic catenary cable element)

일반 거더교와는 달리 현수교는 하중을 보강형에서 행거를 통해 주케이블로 전달하고 케이블에 전달된 힘은 정착부(anchorage)에 직접 흡수되거나 주탑을 통해 기초로 전달된다. 결국 현수교를 해석할 때에는 이들 보강형, 행거, 주케이블, 주탑 등을 어떻게 모델링하느냐에 따라 해석결과에 많은 차이를 보인다.

현수교에서는 케이블자체의 자중으로 인한 새그의 영향으로 탄성계수가 저하하여 비선형성을 나타내고 또한 보강형과 주탑에 작용하는 매우 큰 축력등으로 인해 비선형거동을 나타내며, 이와 같은 기하학적 비선형성을 고려할 수 있는 케이블요소의 강성행렬은 검증된 전 연구결과[2~4]를 본 논문에서도 사용한다.

2.2 케이블요소의 질량행렬

2.2.1 케이블요소의 형상함수

일반적으로 케이블요소는 절점변위의 크기가 같더라도 방향이 다르면 그 형상은 달라진다. 즉 Fig. 1에서 처럼 양(+)의 방향과 음(−)의 방향으로 각각 변위가 발생하면 그 형상이 달라진다. 그러므로 형상함수를 구할 때는 양과 음의 양방향으로 가상의 미소변위를 가하고 달라진 형상을 각각 구해야 한다. 현재까지의 연구결과에 의하면 가상의 미소변위는 10^{-5}~10^{-7} 정도가 적당하며, 양방향과 음방향의 형상함수를 평

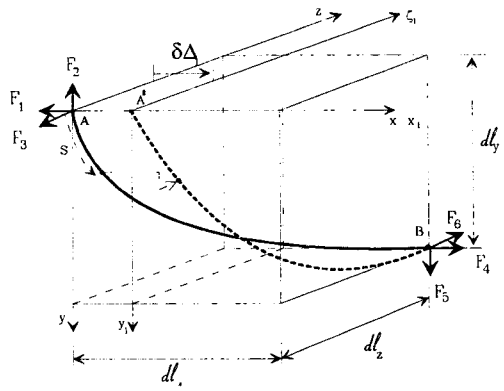

Fig. 1 Shape of cable element by x-directional displacement $\delta \Delta_1$

균한 값을 형상함수로 사용하는 것이 타당하다고 알려져 있다. 구체적인 유도과정을 기술하면 다음과 같다.

Fig. 1과 같이 가상 미소변위 $\delta\Delta_1$을 절점 i에서 x축상의 양(+)의 방향(1 DOF)으로 가하면 절점력의 증분은

$$\begin{Bmatrix}\delta F_1\\ \delta F_2\\ \delta F_3\end{Bmatrix}=[K]\begin{Bmatrix}-\delta\Delta_1\\ 0\\ 0\end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots(1)$$

이고, 여기서 (−)는 가상 미소변위 $\delta\Delta_1$을 양(+)의 방향으로 가하면 투영길이 dl_x가 작아지므로 절점력이 감소함을 나타낸다.

결국 현 상태의 절점력은

$$\begin{Bmatrix}F'_1\\ F'_2\\ F'_3\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}F_1+\delta F_1\\ F_2+\delta F_2\\ F_3+\delta F_3\end{Bmatrix}$$

이고 새로운 케이블형상은 식 (1)에 의해 다음과 같다.

$$\begin{aligned}x_1(s)&=f(F'_1,F'_2,F'_3,s)\\ y_1(s)&=g(F'_1,F'_2,F'_3,s)\\ z_1(s)&=h(F'_1,F'_2,F'_3,s)\end{aligned} \quad \cdots\cdots(2)$$

결국 형상함수는 변형계(x_1, y_1, z_1)와 원형계(x, y, z)의 차를 미소변위 $\delta\Delta_1$로 나누어 주면 된다.

$$\begin{aligned}\phi^+_{1x}&=\frac{\delta\Delta_1+x_1-x}{\delta\Delta_1}\\ \phi^+_{1y}&=\frac{y_1-y}{\delta\Delta_1}\\ \phi^+_{1z}&=\frac{z_1-z}{\delta\Delta_1}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(3)$$

또한 가상 미소변위 $\delta\Delta_1$을 절점 i에 x축의 음(−)의 방향(1 DOF)으로 가하면 절점력의 증분은

$$\begin{Bmatrix}\delta F_1\\ \delta F_2\\ \delta F_3\end{Bmatrix}=[K]\begin{Bmatrix}\delta\Delta_1\\ 0\\ 0\end{Bmatrix}$$

이고, 여기서 (+)는 가상 미소변위 $\delta\Delta_1$을 음(−)의 방향으로 가하면 투영길이 dl_x가 커지므로 절점력은 커짐을 의미한다. 그래서 새로운 케이블 형상은

$$\begin{aligned}x'_1(s)&=f(F'_1,F'_2,F'_3,s)\\ y'_1(s)&=g(F'_1,F'_2,F'_3,s)\\ z'_1(s)&=h(F'_1,F'_2,F'_3,s)\end{aligned}$$

이고 결국 형상함수는

$$\begin{aligned}\phi^-_{1x}&=\frac{-\delta\Delta_1+x'_1-x}{-\delta\Delta_1}=\frac{\delta\Delta_1-x'_1+x}{\delta\Delta_1}\\ \phi^-_{1y}&=\frac{y'_1-y}{-\delta\Delta_1}=\frac{-y'_1+y}{\delta\Delta_1}\\ \phi^-_{1z}&=\frac{z'_1-z}{-\delta\Delta_1}=\frac{-z'_1+z}{\delta\Delta_1}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(4)$$

이다.

마찬가지 과정으로 형상함수를 구하면 형상함수 행렬은

$$H=\begin{bmatrix}\phi_{1x}&\phi_{2x}&\phi_{3x}&\phi_{4x}&\phi_{5x}&\phi_{6x}\\ \phi_{1y}&\phi_{2y}&\phi_{3y}&\phi_{4y}&\phi_{5y}&\phi_{6y}\\ \phi_{1z}&\phi_{2z}&\phi_{3z}&\phi_{4z}&\phi_{5z}&\phi_{6z}\end{bmatrix} \quad \cdots\cdots(5)$$

이다.

2.2.2 케이블요소의 분포 질량 행렬 (consistent mass matrix)

케이블요소의 분포 질량행렬은 형상함수로부터 D'Alembert의 원리를 이용해 유도하며, 케이블요소의 질량 밀도(mass density)가 요소 전체 길이에 걸쳐 일정하다면 분포 질량 행렬(consistent mass matrix)은 다음과 같다.

$$[M]=\int_v\rho H^T H\,dV=\frac{w_0}{g}\int_0^{L_0}H^T H\,ds$$

$$=\begin{bmatrix}m_{11}&m_{12}&m_{13}&m_{14}&m_{15}&m_{16}\\ m_{21}&m_{22}&m_{23}&m_{24}&m_{25}&m_{26}\\ m_{31}&m_{32}&m_{33}&m_{34}&m_{35}&m_{36}\\ m_{41}&m_{42}&m_{43}&m_{44}&m_{45}&m_{46}\\ m_{51}&m_{52}&m_{53}&m_{54}&m_{55}&m_{56}\\ m_{61}&m_{62}&m_{63}&m_{64}&m_{65}&m_{66}\end{bmatrix} \quad \cdots(6)$$

여기서, 질량행렬의 임의 요소는

$$m_{ij}=\frac{w_0}{g}\int_0^{L_0}(\phi_{ix}\phi_{jx}+\phi_{iy}\phi_{jy}+\phi_{iz}\phi_{jz})\,ds$$

이다.

2.3 3차원 절점 연결요소(3 dimensional flexible connection element)

사장교의 주형 및 현수교의 보강형을 가설할 때는 각 부재의 이음부를 순차적으로 강결하거

나 전체 힌지공법으로 전체 보강형이 가설될 때까지 모두 힌지상태로 둘 수 있다. 따라서 이러한 시공단계별 시공이음의 체결상태를 모델링하기 위해서는 회전변형을 원하는 만큼 자유로이 전달할 수 있는 요소가 필요하다. 이러한 3차원 연결요소(Flexible joint connection element)는 먼저 직선 2차원요소를 유도하고 이를 3차원으로 확장한 3차원보요소에 다음과 같이 양 절점에 회전요소를 유도하여 부착시켜 사용한다. 3차원 절점 연결 요소는 Fig. 2와 같이 길이 L, 면적 A, 탄성계수 E, 단면이차모멘트 I_y, I_z, 전단상수 G, 비틂상수 J를 갖는 3차원 직선부재(Line element, b 요소)와, 그 부재 양 절점 1, 2단에 각각 휨강성 $c_{12}\cdot EI_y$, $c_{13}\cdot EI_z$와 $c_{22}\cdot EI_y$, $c_{23}\cdot EI_z$를 갖는 미소 회전요소(a, c요소)로 구성된다. 미소 회전요소의 길이는 매우 작으므로 이동변위(translation)는 직선 부재(b)의 절점이동 변위와 같지만 회전(rotation)은 c_{12}, c_{13}와 c_{22}, c_{23}으로 전달하는 량을 조절할 수 있다.

전체 연결요소의 강도매트릭스는 다음과 같다.

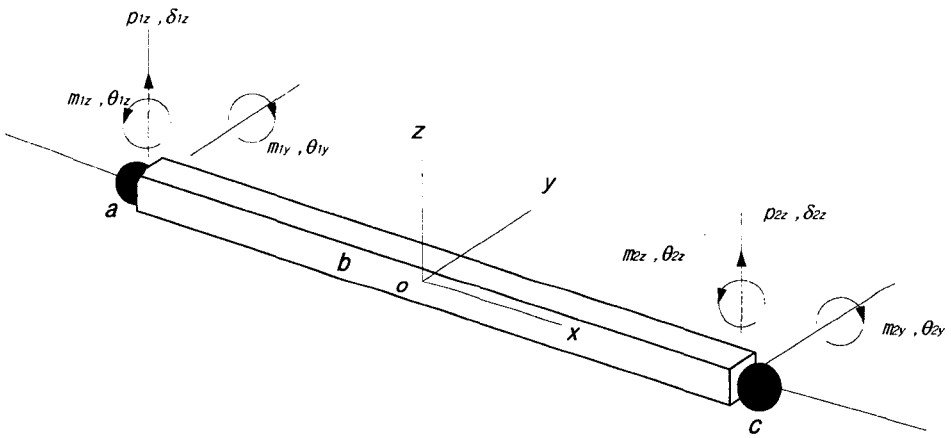

Fig. 2 Three dimensional nodal connection element

$$P_1=H_1\,r=H_1\,Ke=H_1\,KH_1^T d_1+H_1\,KH_2^T d_2$$

$$P_2=H_2\,r=H_2\,Ke=H_2\,KH_1^{T'}+H_2\,KH_2^T d_2$$

$$\begin{Bmatrix}P_1\\P_2\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}K_{11} & K_{12}\\ K_{21} & K_{22}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}d_1\\d_2\end{Bmatrix}$$

$$K_{11}=\begin{bmatrix}
\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & a\cdot\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & e\cdot\frac{6EI_z}{L^2}\\
0 & 0 & b\cdot\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & f\cdot\frac{6EI_y}{L^2} & 0\\
0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0\\
0 & 0 & f\cdot\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & c\cdot\frac{4EI_y}{L} & 0\\
0 & e\cdot\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & d\cdot\frac{4EI_z}{L}
\end{bmatrix}$$

$$K_{12}=\begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a\cdot\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & i\cdot\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -b\cdot\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & j\cdot\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f\cdot\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & g\cdot\frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -e\cdot\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & h\cdot\frac{2EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

$$K_{21}=K_{12}^T$$

$$K_{22}=\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a\cdot\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -i\cdot\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & b\cdot\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -j\cdot\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j\cdot\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & k\cdot\frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -i\cdot\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & l\cdot\frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

여기서, $t_y=c_{12}c_{22}+4c_{12}+4c_{22}+12$, $t_z=c_{13}c_{23}+4c_{13}+4c_{23}+12$ 라 하면

$$a=\frac{c_{13}c_{23}+c_{13}+c_{23}}{t_z},\quad b=\frac{c_{12}c_{22}+c_{12}+c_{22}}{t_y}$$

$$c=\frac{c_{12}(3+c_{22})}{t_y},\quad d=\frac{c_{13}(3+c_{23})}{t_z}$$

$$e=\frac{c_{13}(2+c_{23})}{t_z},\quad f=-\frac{c_{12}(2+c_{22})}{t_y}$$

$$g=\frac{c_{12}c_{22}}{t_y},\quad h=\frac{c_{13}c_{23}}{t_z}$$

$$i=\frac{(c_{13}+2)c_{23}}{t_z},\quad j=-\frac{(c_{12}+2)c_{22}}{t_y}$$

$$k=\frac{(c_{12}+3)c_{22}}{t_y},\quad l=\frac{(c_{13}+3)c_{23}}{t_z}$$

3. 수치해석 예

3.1 구조 형식 및 제원[1)]

본 연구에서는 전형적인 타정식 3경간 단순지지 현수교인 남해대교에 대하여 수치해석을 실시하여 그 적용성을 검증하고자 한다. 남해대교의 구조형식 및 구조제원은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Structural geometry of the Namhae Bridge

Span length (m)	128-404-128
Wideness (m)	11
Sag ratio	1/12
Anchorage type	Earth anchor
Shape of main cable	Parabolic
Shape of main tower	H-type
Support condition	Simple span
Section type	Streamlike box

3.2 정적 비선형해석

이미 1993년 안전진단시 실측된 값[1)]과의 비교를 위해 Fig. 3과 같이 재하한 경우에 대해서 본

Table 2 Structural dimensions of the Namhae Bridge

Main girder	
Weight per unit length (ton/m)	4.235
Elastic modulus (ton/m^2)	2.1×10^7
Moment of inertia(I_{33}) (m^4)	0.1316
Moment of inertia(I_{22}) (m^4)	3.2667
Tortional moment of inertia(J) (m^4)	0.4399
Main cable	
Weight per unit length (ton/m)	0.6908
Horizontal initial tension (ton)	3063
Sectional area (m^2)	0.08356
Distance per hanger (m)	11
Elastic modulus (ton/m^2)	2.0×10^7

연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 재하차량의 총적재 중량은 23 t 이고, 재하위치는 Table 3과 같고 재하방법은 2대(46 t)를 동시에 교폭의 중앙에 병행하여 재하한다.

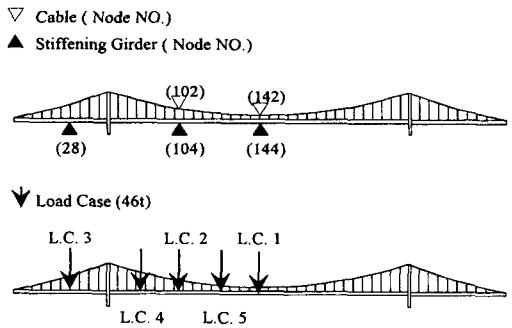

Fig. 3 Loading position and measuring point of testing truck1

Table 3 Loading position and load cases

Load case	Loading position
1	Middle point of main span(L_2/2)
2	L_2/4 point from Hadong of main span
3	L_1/2 point of side main to Hadong
4	L_2/8 point from Hadong of main span
5	3L_2/8 point from Hadong of main span

여기서 L_1 ,L_2 ,L_3는 각각 하동측 경간길이, 주경간 길이, 남해측 경간길이이다. Fig. 4와 Fig. 5는 사하중상태에서 남해대교의 모멘트도와 처짐도이다. 이론적으로 사하중상태에서 처짐이 없는 상태가 되어야 하나 초기형상 결정해석에서 보강형의 자중을 Lagrangian 좌표에 기초해서 실제보다 약간 과대하게 평가되어 케이블의 무응력 길이가 다소 작아져서 상향 처짐이 생긴 것이다. 하지만 설계장력이 일치하고 케이블의 설계새그량 33.3m에 비해 0.284m는 0.9%의 근소한 량이므로 위 초기형상은 합리적으로 결정되었고 이후 활하중 해석이나 지진해석에 큰 영향이 없으리라 판단된다.

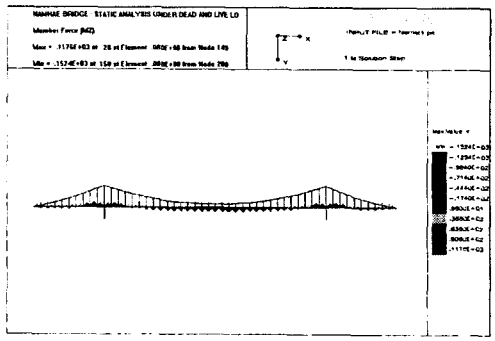

Fig. 4 Moment diagram under the dead load

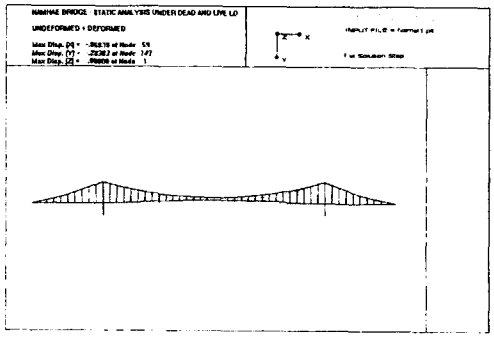

Fig. 5 Deflection curve under the dead load

Table 4는 각 재하 경우에 대해 주케이블과 보강형의 연직변위를 해석한 값과 재하시에 얻은 측정치를 나타낸다.

Table 4에서 보면 본 연구에서 해석한 값과 실제 교량에서 측량한 값사이에는 오차가 약 1% 내외로 거의 비슷하다. 따라서 본 연구의 해

석 프로그램은 현수교의 정적 비선형거동을 해석하는데 있어서 적합한 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of vertical deflections(m)

Load case	Measuring point	This study	Measured deflection1
1	Main cable $L_2/2$	0.3178	0.314
	Main girder $L_2/2$	0.3194	0.312
2	Main cable $L_2/4$	0.3568	0.367
	Main girder $L_2/4$	0.3610	0.373
3	Main cable $L_1/2$	0.2389	-
	Main girder $L_1/2$	0.2437	0.236
4	Main cable $L_2/4$	0.2108	-
	Main girder $L_2/4$	0.2118	0.211
5	Main cable $L_2/4$	0.2221	-
	Main girder $L_2/4$	0.2232	0.214

3.3 동적해석

정적 평형상태에서 강성 행렬과 질량 행렬을 구하고 남해대교의 진동 특성을 알아보기 위해 자유 진동 해석을 수행하고 기존의 해석 결과[1,5]와 비교하였다.

Table 5 Natural frequencies of the Namhae Bridge

모드	Direction	Shape	Natural frequency(Hz)	
			Reference[4,5]	This study
1	Vertical	Antisymmetric	0.2185	0.21848
2	Vertical	Symmetric	0.2485	0.24821
3	Lateral	Symmetric	0.2717	0.27126
4	Vertical	Symmetric	0.3602	0.35970
5	Vertical	Antisymmetric	0.3860	0.38567
6	Lateral	Antisymmetric	0.4844	0.49867
7	Vertical	Symmetric	0.5002	0.50167
8	Lateral	Symmetric	0.5085	0.52174
9	Vertical	Antisymmetric	0.5286	0.52814
10	Lateral	Antisymmetric	0.5921	0.58906

위 표에서 보면 참고문헌 1), 5)와 1% 이내의 근소한 차이를 보이는데 이는 계산상의 오차와 모델링 방법의 상이에서 기인한다고 판단된다.

각 모드별로 모드형상을 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다.

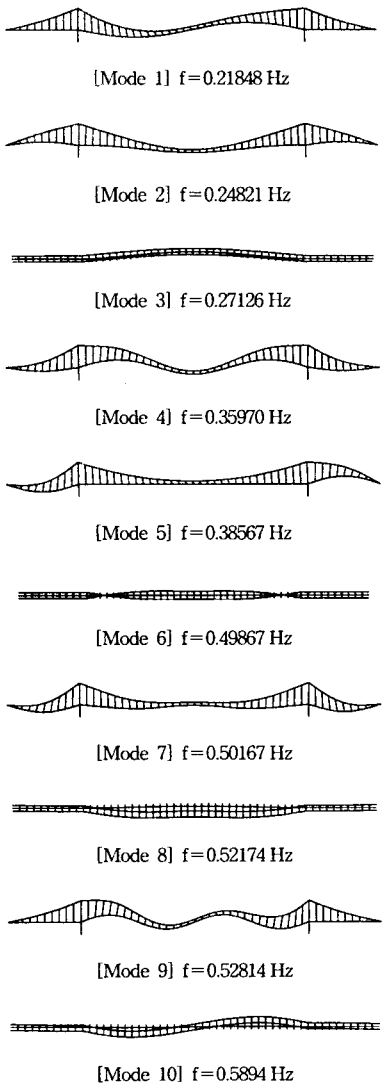

Fig. 6 Natural modes of the Namhae Bridge

이 해석결과를 보면 초기 10개 진동모드에서 비틂진동모드가 나타나지 않고 있다. 즉, 최초 휨진동수와 비틂진동수의 비율이 2.0이상이므로 구조물의 붕괴를 유발할지도 모르는 fluttering에 안전함을 알 수 있다. 또한 SAP90 Example 25의 8초간의 Elcentro 지진데이타를 이용하여 남해대교를 Newamark-β 법으로 감쇠비 2%에 대하여 동적시간이력해석(Time history analysis)을 수행한 결과 Fig. 7과 같이 하동측 앵커블

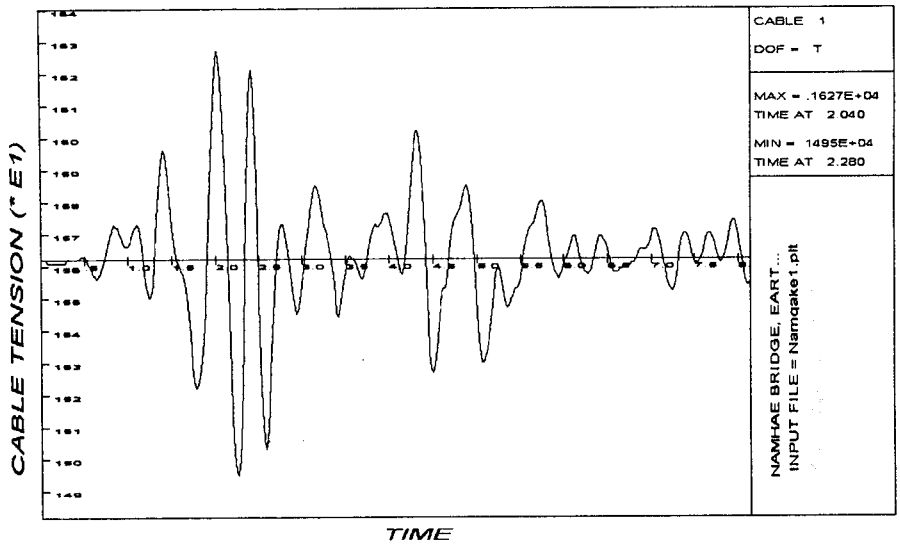

Fig. 7 Tensile forces of the main cable by time series analysis

력의 케이블에 대한 장력의 변동 추이를 얻을 수 있다.

3.4 시공단계별 해석

남해대교의 시공단계를 설명하면 먼저 주탑을 가설하고 주케이블을 설치한 후 주경간은 중앙에서 좌우로 주탑을 향해서 보강형을 한 블록씩 가설하고 측경간은 앵커리지에서 한 블록씩 주탑을 향해서 가설한다. 따라서 시공단계별 해석은 이러한 공정을 전부 27단계로 나누어 각 단계별로 기하학적 비선형해석을 수행하여 구조물의 기하형상 변화를 추적하였다. 여기서는 전부 27단계중에서 구조적으로 의미가 있는 5단계만을 선택하여 그림으로 보여준다(Fig. 8~Fig. 12). 먼저 Fig. 8은 주탑과 케이블만 가설했을 때 처짐형상이다. 그리고 Fig. 9는 주경간 보강형을 4개블럭씩 8개블럭을 가설한 상황이다. Fig. 10은 주경간을 전부 가설했을 때 상황이고 Fig. 11은 측경간 일부를 가설했을 때이며 Fig. 12는 측경간 전부를 가설한 완성계의 처짐형상이다. 이상을 정리하면 Table 6와 같다. Fig. 13은 주경간 중앙점의 각 시공단계별 연직변위의 변화추이를 보여주고 있다. 케이블만 가설했을 때 보강형의 사하중이 전혀 작용하지 않으므로 2.975m

Table 6 Construction contents per each step

Step	Construction contents	Deformed shape
1	Main tower, main cable	<Fig. 8>
5	Main tower, main cable, uncompleted main span	<Fig. 9>
17	Main tower, main cable, completed main span	<Fig. 10>
24	Main tower, main cable, completed main span, uncomplete side span	<Fig. 11>
27	All completed	<Fig. 12>

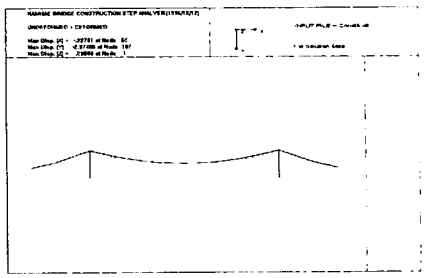

Fig. 8 1st construction step

만큼 상향 처짐이 발생하다가, 주경간 보강형을 가설하면서 내려가기 시작한다. 주경간 보강형을 8개 블록을 가설했을 때 최대 1.839m 하향

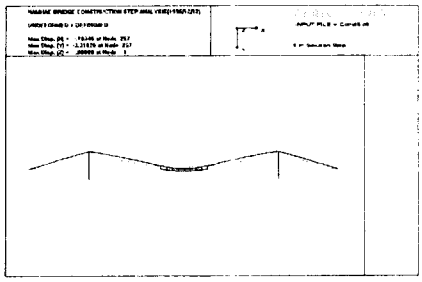

Fig. 9 5th construction step

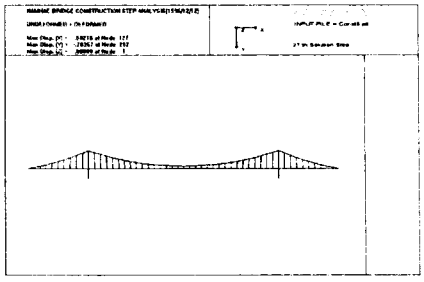

Fig. 11 24th construction step

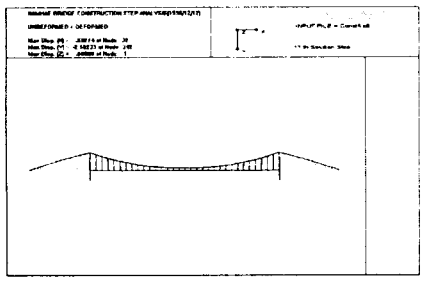

Fig. 10 17th construction step

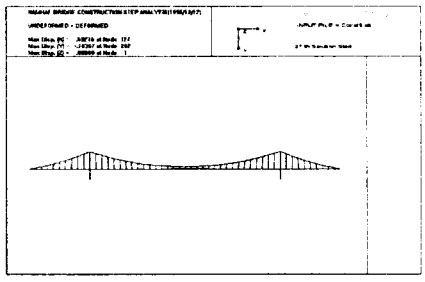

Fig. 12 27th completed step

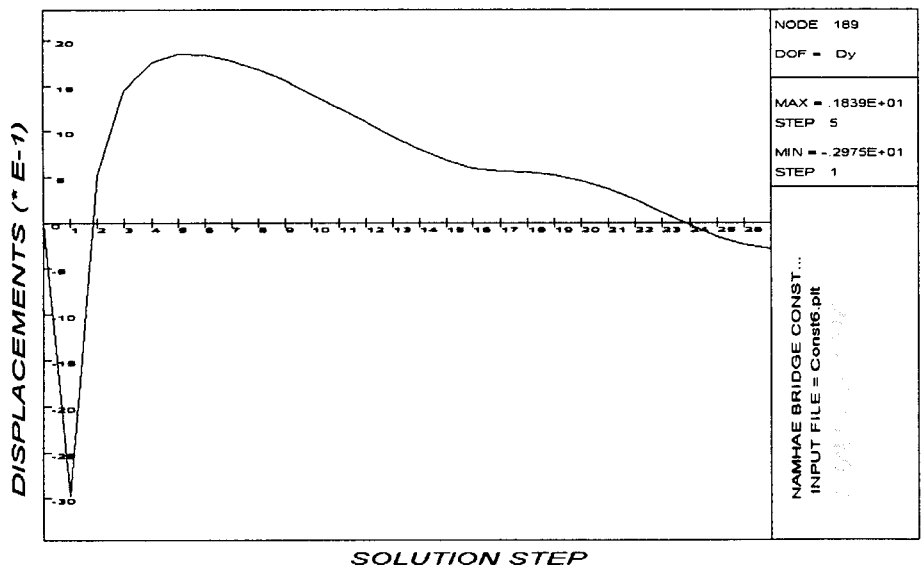

Fig. 13 Vertical displacements of the middle point of main span at constructionsequences

처짐이 발생한다. 이후 보강형을 추가로 가설하면서 처짐이 회복되어 Fig. 12와 같이 완성계 해석을 수행했을 때의 상향 처짐 0.28m로 된다. 한편 각 시공단계별로 알고자 하는 주케이블의 목

표 새그는 완성계의 설계 새그량 33.3m에서 위 연직변위들을 빼주면 구할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현수교의 기하학적 비선형거동과 동적거동 및 시공단계별 해석을 할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이를 남해대교에 실제로 적용하므로서 그 적용성을 검증하였다. 측정치와 비교한 결과는 해석치가 매우 양호한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 질량행렬구성에 의한 해석방법이 매우 안정적인 해를 보여 주며, 또한 개발된 프로그램은 시공단계별 해석 및 안전도평가 시에 매우 효율적이고 경제적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1) 건설교통부, 남해대교 안전진단보고서, 1993
2) 김호경, "시공상태를 고려한 현수교의 3차원 해석", 서울대학교 박사학위 논문, 1993
3) 방명석, 김영진, 박종섭, "장대교량의 설계 및 시공에 관한 연구", 건설기술연구원, 1985~1987.
4) 안상섭, "Static and dynamic nonlinear analysis of spatial cable networks using elastic catenary cable element", 서울대학교 석사학위 논문, 1991.
5) 현창헌, 현수교의 풍하중과 지진하중에 대한 추계론적 거동해석, 한국과학기술원 박사학위 논문, 1989.