

# 해양 케이블 지지구조물의 구조해석을 위한 개선된 유한요소해석모델

김선훈\* · 송명관\*\* · 노혁천\*\*\*  
\*영동대학교 건설공학부 토목환경공학과  
\*\*일본 동경대학 사회기반공학전공 토목공학과  
\*\*\*미국 콜롬비아대학 토목공학과

## An Improved Finite Element Analysis Model of Offshore Cable-Supported Structures

SUN-HOON KIM\*, MYUNG-KWAN SONG\*\*, AND HYUK-CHUN NOH\*\*\*

\*Department of Civil Engineering, Youngdong University, Yeongdong, Korea

\*\*Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo, Japan

\*\*\*Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University, New York, USA

**KEY WORDS:** Offshore Cable-supported Structure 해양 케이블 지지구조물, Nonlinear Static Analysis 비선형정적해석, Catenary Function 현수선함수, Stability Function 안정함수

**ABSTRACT:** In this study, the improved three-dimensional analysis model designed for a more accurate analysis of marine cable-supported structures, is presented. In this improved analysis model, the beam elements, of which the stability function is derived using Taylor's series expansions, are used to model space frame structures, and the truss elements. The equivalent elastic modulus of the truss elements is evaluated on the assumption that the deflection curve of a cable has a catenary function. By using the proposed three-dimensional analysis model, nonlinear static analysis is carried out for some cable-supported structures. The results are compared with previous studies and show good agreement with their findings.

### 1. 서 론

구조역학적으로 가장 효율적인 구조형식은 압축에 의한 좌굴 현상을 고려할 필요가 없는 인장재인 케이블을 주부재로 사용하는 케이블 구조물이다. 해양구조물에 있어서의 케이블구조물의 사용 증가에 따라서, 케이블 인장력 및 케이블 변위는 해양구조물의 설계에 있어서 고려되어야 할 중요한 인자가 되고 있다. 따라서, 케이블에 대한 정확한 해석모델의 정립이 필요하다(Chucheepsakul, 2003). 대부분의 케이블지지 구조물은 재료적으로는 선형거동을 하지만 전체적인 변위-하중관계는 비선형거동을 나타낸다. 비선형 거동은 크게 다음의 이유에 의해 기인한다(Fleming, 1989). 첫째, 케이블의 비선형 거동 : 새그(sag)에 의한 케이블의 비선형 축력-축변형 거동, 즉 장력증가에 따른 케이블의 강성 증가. 둘째, 휨부재의 비선형 거동 : 프레임부재에 작용하는 큰 압축력에 의한 휨강성의 저하, 즉, 보-기둥 효과. 셋째, 대변위문제 : 설계하중에 대해서 구조물의 변위가 크게 발생하여 변형 전후의 형상 차이를 무시할 수 없을 경우, 즉, 좌표계 변환행렬의 재구성 및 비보존력 문제 등. 따라서, 해양케이블지

지 구조물의 구조해석을 위해서는 이러한 비선형거동의 영향을 충분히 고려할 수 있어야 한다.

케이블은 휨, 비틀림, 압축력 등에 대해서는 지지할 수 없고 오직 인장력에 대해서만 지지할 수 있는 부재이다. 따라서, 케이블은 외력을 받게 되면 대변형(large deformation)이 발생하게 되어서 비선형 거동을 나타내게 된다. 이러한 케이블의 비선형성을 고려하여 모델링하는 대표적인 방법으로는 Ernst의 등가탄성계수(equivalent modulus of elasticity) 트러스요소를 사용하는 방법(Fleming and Egeseli, 1980), 탄성현수선 케이블(elastic catenary curve)요소를 사용하는 방법 등이 있다. 그러나, Ernst의 등가탄성계수 트러스요소를 사용하는 방법은 새그가 큰 경우에 많은 오차가 발생하며, 탄성현수선 케이블요소를 사용하는 방법은 유도가 복잡하고 사용이 까다로운 문제점을 보여주었다.

본 연구에서는 해양 케이블지지 구조물의 정적 및 동적거동 해석을 위한 개선된 유한해석모델을 제시한다. 본 연구에서의 케이블 유한요소는 현수곡선에 적합한 등가탄성계수를 유도하여 트러스요소에 적용시킨다. 주탑이나 보강형에 작용하는 큰 압축력에 의한 휨강성의 저하를 고려하기 위한 안정함수를 사용하며, 이러한 안정함수들을 안정화하기 위하여 Taylor의 급수전개를 이용한다.

제1저자 김선훈 연락처: 충청북도 영동군 영동읍 설계리 산 12-1  
043-740-1171, kimsh@youngdong.ac.kr

## 2. 케이블의 모델링

### 2.1 등가탄성계수

케이블구조물의 해석에 있어서 사용재료는 탄성범위 안에서 거동하는 것으로 가정되므로 구조체의 부재에 작용하는 작용력 계산에 탄성이론이 적용된다. 사장재 작용력은 현의 방향으로 선형으로 보나 실제적으로는 자중에 의한 약간의 처짐이 발생하고 있다. 케이블의 유연성(flexibility)으로 인하여 길이에 따라 처짐이 변하게 되므로 이러한 비선형성은 보정되어야 한다. 기존의 여러 문헌을 통하여 가장 많이 이용되는 방법은 케이블의 등가탄성계수를 이용하는 방법이다. 해석의 기본 개념은 곡선형으로 처진 케이블을 등가탄성계수를 사용하여 선형화하는 방법이다. 본 연구에서는 Ernst가 제안한 등가탄성계수 트리스요소 개념을 이용하되, 케이블에 대한 해석의 정확성을 개선시키기 위하여 현수선함수(catenary function)를 이용하여 등가탄성계수에 관한 식을 유도하여 사용한다.

Fig. 1에서는 인장력  $T_i$ 가 케이블에 가해지고 있을 때의 상태를 보이고 있으며, 이러한 인장력 증가 전의 상태에서 케이블에 대한 현수선 함수는 다음과 같다.

$$y = \frac{T_i}{w} \left\{ \cosh \left[ \frac{w}{T_i} \left( x - \frac{1}{2} L_c \right) \right] - \cosh \left( \frac{w L_c}{2 T_i} \right) \right\} \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 케이블의 자중이다.

그리고, 인장력 증가 후의 상태에서 케이블에 대한 현수선 함수는 다음과 같다.

$$y = \frac{T_f}{w} \left\{ \cosh \left[ \frac{w}{T_f} \left( x - \frac{L_c + \delta}{2} \right) \right] - \cosh \left( \frac{w(L_c + \delta)}{2 T_f} \right) \right\} \quad (2)$$

여기서,  $\delta$ 는 케이블의 신장량이다.

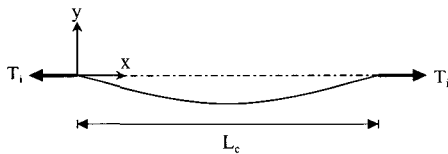


Fig. 1 Cable before increment of tensile force

인장력 증가전과 증가후의 케이블의 총길이  $s_1$ 과  $s_2$ 에 대해서 인장력이 0일 때를 기준으로 하여 인장력이 각각  $T_i$ 와  $T_f$ 일 때의 케이블의 총신장량(total elongations)은  $\delta \ll L_c$ 이라는 가정 하에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta s_1 &= \frac{T_i}{E_e A} \int_0^{L_c} \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx \\ &= \frac{T_i^2}{2 E_e A w} \left[ \sinh \left( \frac{w L_c}{T_i} \right) + \frac{w}{T_i} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta s_2 = \frac{T_f^2}{2 E_e A w} \left[ \sinh \left( \frac{w L_c}{T_f} \right) + \frac{w L_c}{T_f} \right] \quad (4)$$

여기서,  $E_e$ 는 케이블 재료의 탄성계수,  $A$ 는 케이블의 단면적이다.

위의 식과 방정식  $\delta = s_2 - s_1 = \Delta s_2 - \Delta s_1$ 을 이용하면 케이블 양 끝단의 상대변위,  $\delta$ 에 대해서 다음과 같은 식의 유도가 가능하다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\left( \frac{T_f - T_i}{2 E_e A} L_c + \frac{1}{2 E_e A w} \left[ T_f^2 \sinh \left( \frac{w L_c}{T_f} \right) - T_i^2 \sinh \left( \frac{w L_c}{T_i} \right) \right] \right)}{\cosh \left( \frac{w L_c}{2 T_f} \right)} \\ &+ \frac{\frac{2}{w} \left[ T_i \sinh \left( \frac{w L_c}{2 T_i} \right) - T_f \sinh \left( \frac{w L_c}{2 T_f} \right) \right]}{\cosh \left( \frac{w L_c}{2 T_f} \right)} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 식 (5)를 이용하여 Fig. 2와 같이  $\alpha$ 만큼 경사진 케이블의 활선탄성계수(Secant modulus of elasticity)에 대한 식을 유도할 수 있다( $w \rightarrow w \cos \alpha$ ,  $L_c \rightarrow H / \cos \alpha$ ).

$$E_{\text{sec}}^c = \frac{E_e}{(1 + C_1 + C_2) / 2 \cosh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T_f} \right)} \quad (6)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{w L_c \cos \alpha (T_f - T_i)} \left[ T_f^2 \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{T_f} \right) - T_i^2 \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{T_i} \right) \right] \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{4 E_e A}{w L_c \cos \alpha (T_f - T_i)} \left[ T_i \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T_i} \right) - T_f \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T_f} \right) \right] \quad (8)$$

또한,  $T_f \rightarrow T_i$ 를 적용하여 케이블의 접선탄성계수(tangent modulus of elasticity)의 유도가 가능하다.

$$E_{\text{tan}}^c = \frac{E_e}{(1 + C_1 + C_2) / 2 \cosh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T} \right)} \quad (9)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{w L_c \cos \alpha} \left[ 2 T \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{T} \right) - w L_c \cos \alpha \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{T} \right) \right] \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{-4 E_e A}{w L_c \cos \alpha} \left[ \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T} \right) - \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T} \sinh \left( \frac{w L_c \cos \alpha}{2 T} \right) \right] \quad (11)$$

2.2 강성도행렬

식 (6)과 (9)의 할선탄성계수와 접선탄성계수를 적용하면 케이블 부재의 탄성요소강성도행렬의 구성이 가능하다. 본 연구에서는 식 (9)의 접선탄성계수를 적용한다.

케이블의 기하강성도행렬은 트러스요소의 구성 방법과 같다. 따라서, 구성되는 기하강성도행렬은 다음과 같다(Nazmy and Adel-Ghaffar, 1990).

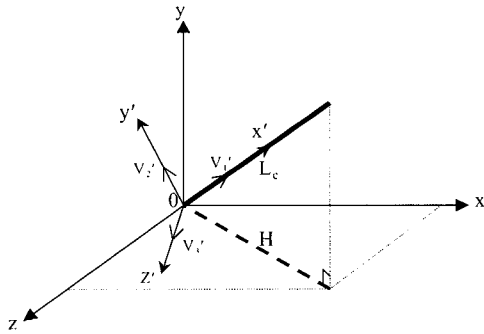


Fig. 2 Local coordinate system and direction cosine of cable and beam member ( $v_1, v_2, v_3$ )

$$[K_g]_c = \begin{bmatrix} [G]_c & -[G]_c \\ -[G]_c & [G]_c \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (12)$$

여기서, 부행렬(sub-matrix)  $[G]_c$ 는 다음과 같다.

$$[G]_c = \frac{T}{L_c} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서, 케이블 부재의 인장력의 변화에 따른 케이블 부재의 총요소강성도행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$[K_t]_c = [K_e]_c + [K_g]_c \quad (14)$$

3. 프레임부재의 모델링

3.1 강성도행렬

축력과 휨모멘트를 동시에 받는 보에 대한 평형관계와 운동학적 관계를 고려하면, 축력의 영향을 고려한 보의 탄성강성행렬의 유도가 가능하다. 이러한 축력과 휨모멘트 사이의 상호작용은 안정함수 개념을 도입함으로써 고려가 가능하며, 다음 식과 같이 보의 탄성요소강성행렬을 구성한다.

$$[K_t]_b = [K_e]_b + [K_g]_b \quad (15)$$

요소좌표계에서 구성된 총요소강성행렬을 전체좌표계로 변화시켜야 한다. 보요소의 경우 하중증분에 따른 절점변위에 의해서 Fig. 3과 같이 초기의 요소좌표계는 변화하게 되므로, 총요소강성행렬을 전체좌표계로 변화시키기 위한 변환행렬은 하중증분 단계에 따라서 변화하게 된다(박춘근과 박한일, 1999; 조규남 등, 2000).

요소좌표계에서의 자유도와 전체좌표계간의 자유도 사이에서의 관계를 이용하여 다음과 같은 변환행렬의 구성이 가능하다.

$$[T] = \begin{bmatrix} [t]_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [t]_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [t]_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [t]_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$[t]_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{i1} & \sin \theta_{i1} \\ 0 & -\sin \theta_{i1} & \cos \theta_{i1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{x_i} & m_{x_i} & n_{x_i} \\ l_{y_i} & m_{y_i} & n_{y_i} \\ l_{z_i} & m_{z_i} & n_{z_i} \end{bmatrix} = [\beta]_i [\lambda]_0 \quad (17)$$

여기서,  $[\lambda]_0 = \langle v_1 \ v_2 \ v_3 \rangle^T$ 이며,  $v_1, v_2, v_3$ 는 각 하중증분에서의 발생변위에 따라 보요소에서 정의되는 방향벡터로서,  $v_1 = \langle l_{x_0} \ m_{x_0} \ n_{x_0} \rangle$ ,  $v_2 = \langle l_{y_0} \ m_{y_0} \ n_{y_0} \rangle$ ,  $v_3 = \langle l_{z_0} \ m_{z_0} \ n_{z_0} \rangle$ 이다(Fig. 6).

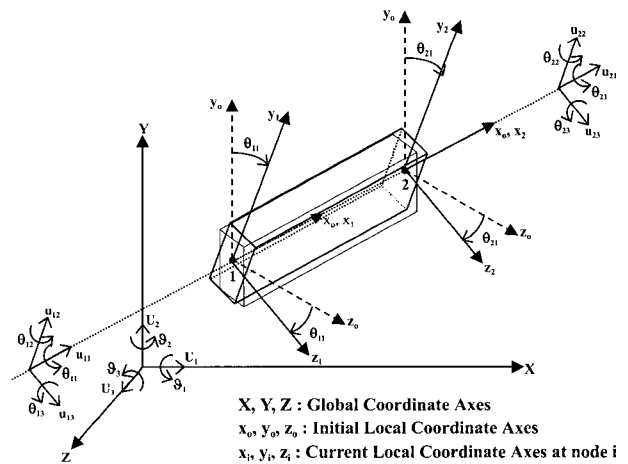


Fig. 3 Change of global and local coordinate system

각 하중증분 단계에 따라서 수정된 초기방향벡터는 절점에서의 비틀림 회전(torsional rotation)의 영향에 의하여 식 (18)과 같이 다시 수정되어, 변환행렬의 구성시 이용된다. 이렇게 구성된 변환행렬에 의해서 전체좌표계에 대한 보요소의 총강성행렬의 구성이 가능하다(Tezcan and Mahapatra, 1969; 정동원 등, 1997).

$$[K_t]_b^G = [T]^T [K_t]_b [T] \quad (18)$$

케이블 부재의 경우에는 비틀림 회전의 영향을 고려할 필요 없이 기존의 변환행렬구성 방법을 통하여 전체좌표계에 대한 총강성행렬의 구성이 가능하다.

3.2 안정함수의 수정

Fleming(1989)이 사용한 안정함수 중에서  $S_{1z} \sim S_{4z}$ 는  $\omega$ 가 0에 가까운 값일 때,  $R_c$ 와  $R_t$ 가 0에 가까운 값을 가지므로 수치적으로 매우 불안정한 값을 가지게 된다. 여기서,  $\omega = \mu L$ ,  $\mu^2 = P/EI_z$ 이다( $P$ 는 축력,  $E$ 는 재료의 탄성계수,  $I_z$ 는  $z$ 축에 대한 단면2차모멘트). 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점의 해결책으로서 다음과 같이 안정함수를 Taylor 급수로 전개하는 방법을 사용한다(최창근 등, 1996).

$$\begin{aligned}
 S_{1z} &= \left(1 \pm \frac{\omega^2}{6} + \frac{\omega^4}{120} \pm \frac{\omega^6}{5040} + \frac{\omega^8}{362880}\right) / R_t \\
 S_{2z} &= \left(1 \pm \frac{\omega^2}{12} + \frac{\omega^4}{360} \pm \frac{\omega^6}{20160} + \frac{\omega^8}{1814400}\right) / R_t \\
 S_{3z} &= \left(1 \pm \frac{\omega^2}{10} + \frac{\omega^4}{280} \pm \frac{\omega^6}{15120} + \frac{\omega^8}{1330560}\right) / R_t \\
 S_{4z} &= \left(1 \pm \frac{\omega^2}{20} + \frac{\omega^4}{840} \pm \frac{\omega^6}{60480} + \frac{\omega^8}{6652800}\right) / R_t \quad (19)
 \end{aligned}$$

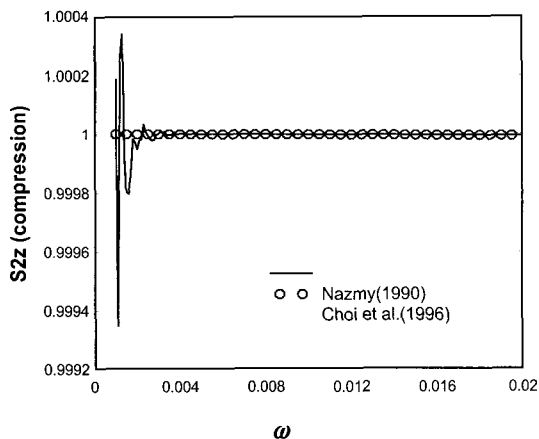
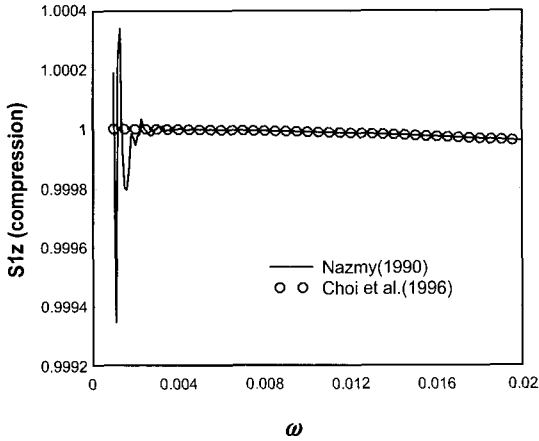


Fig. 4 수정된 안정함수

여기서,  $R_{tc} = 1 \pm \frac{\omega^2}{15} + \frac{\omega^4}{560} \pm \frac{\omega^6}{37800} + \frac{\omega^8}{3991680}$  이고, 인장력인 경우  $P$ 는 양, 압축력인 경우  $P$ 가 음이며, 인장력인 경우  $(\pm)$ 는  $(+)$ , 압축력인 경우  $(\pm)$ 는  $(-)$ 이다.

안정함수  $S_{1y} \sim S_{4y}$ 도 위의 식에  $I_z$ 를  $I_y$ 로 대치시킴으로써 같은 방법으로 정의된다. 그리고,  $S_5$ 는 Nazmy and Adbel-Ghaffer(1990)가 사용한 식을 그대로 사용한다. Fig. 4에서 보인 바와 같이 사용된 안정함수는 안정된 형태로 수정되었음을 알 수 있다.

4. 수치해석법

재료비선형 또는 기하학적 비선형을 고려하여 구조해석을 수행하는 경우 강성도행렬에 비선형항이 포함되기 때문에 일반적으로 반복해석을 통하여 구조물의 변위를 구하게 된다. 즉, 비선형 문제를 구간마다 선형화하여 이를 연속적으로 계산하는 방법이다. 이러한 반복해석 방법들에는 증분법, 반복법, 혼합법 등이 있다. 본 연구에서는 하중을 작용시킬 때는 증분법을 사용하고, 전체 하중이 다 작용되면 불평형하중(unbalanced force)을 반복법으로 구하여 다시 이 불평형 하중을 증분으로 나누어 작용시키는 혼합법을 사용하였다.

5. 예제해석

제안한 해석모델을 사용하여 간단한 케이블구조물 및 케이블지지구조물에 대해서 해석하고 그 결과를 기존의 연구 결과와 비교하였다.

본 연구에서 구현된 보요소에 의한 기하비선형 해석의 정확성을 검증하기 위해서 Fig. 5와 같은 외팔보를 해석하여 이론해와 비교해 보았다. 외팔보는 10개의 보요소에 의하여 모델링되었으며, 구현된 보요소를 이용한 해석에 의한 우측단에서의 연직변위, 수평변위 그리고 회전변위를 이론해와 비교하였다 (Table 1)(현대건설기술연구소, 1994), 결과의 비교를 통하여 볼 때, 정확한 해석결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

5.1 외팔보(Cantilever)

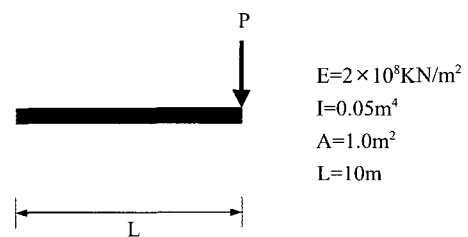


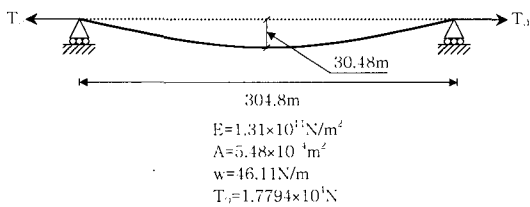
Fig. 5 Cantilever

**Table 1** Normalized value of displacement

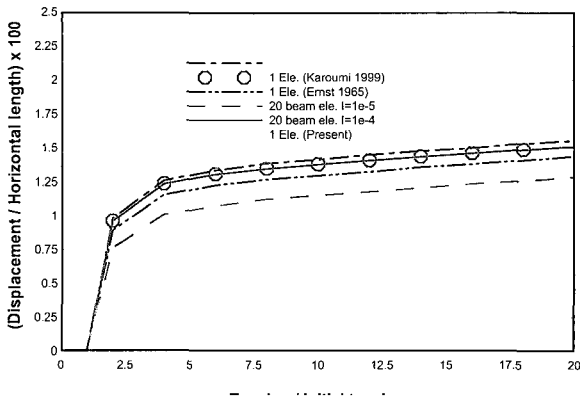
PL <sup>2</sup> /EI	$\delta/L$		$\delta/L$		$\theta/2\pi$	
	이론해	본 연구	이론해	본 연구	이론해	본 연구
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.2	0.066	0.066	0.003	0.003	0.063	0.063
0.4	0.131	0.131	0.010	0.010	0.126	0.126
0.6	0.192	0.192	0.022	0.022	0.185	0.185
0.8	0.249	0.250	0.038	0.038	0.241	0.241
1.	0.302	0.302	0.056	0.056	0.294	0.294
1.5	0.411	0.411	0.108	0.108	0.407	0.407
2.	0.493	0.494	0.161	0.160	0.498	0.498
3.	0.603	0.604	0.254	0.254	0.628	0.628
4.	0.670	0.672	0.329	0.328	0.714	0.715
5.	0.714	0.716	0.388	0.387	0.774	0.775
6.	0.745	0.747	0.435	0.434	0.817	0.818
7.	0.767	0.770	0.473	0.472	0.850	0.851
8.	0.785	0.788	0.505	0.504	0.875	0.876
9.	0.799	0.803	0.532	0.531	0.895	0.896
10.	0.811	0.815	0.555	0.554	0.911	0.912
15.	0.848	0.854	0.635	0.634	0.956	0.957

본 연구에서 구현된 보요소에 의한 기하비선형 해석의 정확성을 검증하기 위해서 Fig. 5와 같은 외팔보를 해석하여 이론해와 비교해 보았다. 외팔보는 10개의 보요소에 의하여 모델링되었으며, 구현된 보요소를 이용한 해석에 의한 우측단에서의 연직변위, 수평변위 그리고 회전변위를 이론해와 비교하였다 (Table 1). 현대건설기술연구소 (1994)의 결과와 비교하여 볼 때 정확한 해석결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

**5.2 수평하중을 받는 케이블(새그가 1/10인 경우)**



**Fig. 6** Cable subjected to tensile force (sag 1/10)

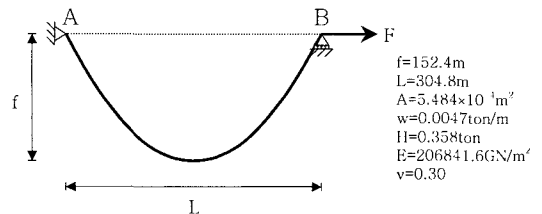


**Fig. 7** Load-deflection curve (sag 1/10)

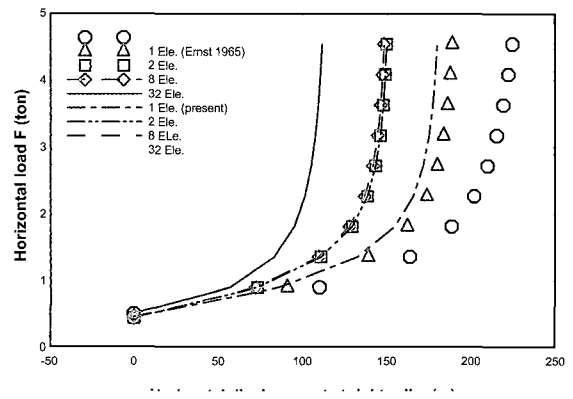
본 논문에서 개발한 케이블요소의 정확성을 검토하기 위하여 Fig. 6과 같이 자중과 양단 수평하중을 받는 케이블 구조물에 대한 해석을 수행하였다. 초기인장력  $T_0$ 가 작용되어 있으며, 양단에서의 수평하중에 의하여 지점에서 수평변위가 발생하며, 케이블 중앙부에서 새그가 변화하게 된다. 본 논문에서 제시한 등가탄성계수 식을 이용한 케이블요소에 의하여 해석을 수행하고, 그 결과를 Karoumi(1999)에 의한 해석결과와 비교하였다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 수평하중의 증가에 따른 수평변위와 새그의 변화를 비교해 볼 때 본 논문에서 제시한 케이블요소에 의한 해석결과는 기존 연구들의 해석결과와 근사한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 케이블의 새그가 전체길이에 비해서 작으므로 현수선형상에 의한 영향이 크게 나타나지 않았다. 또한, 동일한 케이블을 여러개의 보요소를 모델화하여 해석을 수행한 결과와도 비교하였는데, 케이블요소의 해석결과가 더 우수한 것으로 나타났으며, 기존의 범용해석프로그램에서의 보요소에 의해 모델화할 경우 해석상의 오차가 발생하게 됨을 알 수 있다.

**5.3 수평하중을 받는 케이블(새그가 1/2인 경우)**

수평하중을 받는 케이블의 해석 예는 Fig. 8과 같다. Ernst가 제안한 케이블의 등가탄성계수 식을 이용한 경우와 본 연구에서 사용하는 등가탄성계수 식을 이용하여 각각 해석하고, 그 결과를 비교해 보았다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 사용요소의 개수의 증가에 따라 하중 재하점의 수평변위가 수렴하는 것을 관측할 수 있다. 2개의 요소를 사용할 경우 두 식에 의한 해석결과의 차이가 보여지고 있으며, 사용 요소수의 증가에 따라 그 차이가 확연히 감소함을 알 수 있다.



**Fig. 8** Cable subjected to tensile force (sag 1/2)



**Fig. 9** Load-deflection curve (sag 1/2)

5.4 가이드타워(Guyed tower) 구조물

Fig. 10에 보인 바와 같이 상단에 수평하중 222.3KN을 받는 가이드 타워를 해석하였다. 보요소 1개와 케이블 요소 2개로 모델링하여 해석하였으며, 하중 재하점의 수평 변위를 Shefler,et al.(1983)과 Desai et al.(1988)의 해석결과와 비교하였다. Fig. 11과 같이 기존의 연구결과와 비교하여 볼 때, 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

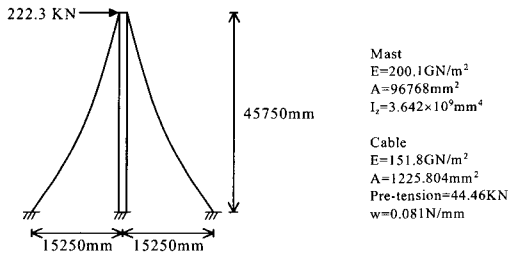


Fig. 10 Guyed tower

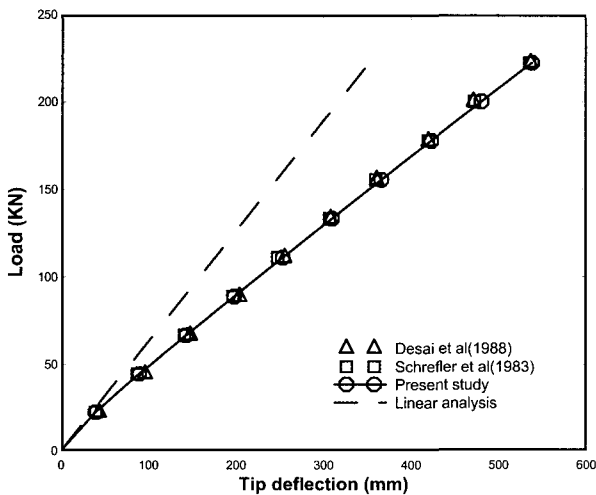


Fig. 11 Horizontal displacement at tip

6. 결 론

본 연구에서는 점차 건설이 확대되고 있는 해양 케이블지지 구조물의 정적 및 동적해석을 위한 개선된 유한요소해석모델을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 케이블 유한요소는 현수선곡선 케이블에 적합한 등가탄성계수를 이론식에 근거하여 유도하였으며, 이를 Ernst등 가탄성계수 트러스요소에 적용시켰다. 따라서, 새그가 비교적 큰 케이블 구조체의 모형화가 가능하고 기하학적 오차를 최소화하고자 케이블을 여러 개의 유한요소로 분할할 수 있도록 개선되었다. 본 연구에서 개발한 케이블유한요소와 구조해석 프로그램의 효율성을 검토하기 위하여 대표적인 케이블지지구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과 본 연구에서 제안한 케이블유한요소는 매우 정확하고 효율적인

결과를 보여줌을 알 수 있었다.

본 연구를 수행하여 얻어진 연구결과와 케이블유한요소, 그리고 해양 케이블지지구조물의 구조해석 프로그램은 추가적인 보완작업을 통하여 향후 ①해양 케이블지지구조물의 구조해석 ②해양 케이블지지구조물의 고유진동해석을 통한 고유진동모드의 예측 ③동수압, 풍압과 같은 동적하중에 대한 해양케이블지지구조물의 구조거동 예측 등의 분야에 적용 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 지원에 의해 설치된 스마트사회 기반시설연구센터(SISTEC)의 지원으로 수행된 연구내용을 정리한 것입니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

박춘근, 박한일 (1999). "프레임형 해양구조물의 보치환기법에 관한 연구", 한국해양공학회 논문집, 제13권, 제1호 pp 23-28.  
 정동원, 김귀석, 양동열 (1997). "얇은 보구조물의 횡좌굴에 대한 Total Lagrangian 유한요소해석", 한국해양공학회 논문집, 제11권, 제4호, pp 17-22.  
 조규남, 이근무, 최영철 (2000). "해저석유개발을 위한 해양구조물의 기본설계/해석 및 실험기법 개발 - 해양구조물에 작용하는 파랑하중 산정에 관한 연구", 한국해양공학회 논문집, 제14권, 제4호, pp 6-10.  
 최창근, 이태열, 홍현석, 김은성 (1996). "사장교 케이블의 단면적의 점진적 최적화에 관한 연구", 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, pp 113-120.  
 현대건설기술연구소 (1994). 현수교의 시공 단계 해석 시스템 개발, 최종연구보고서.  
 Chuचेepsakul, S. (2003). "A Variational Approach for Three-dimensional model of Extensible Marine Cables with Specified Top Tension", Applied Mathematical Modeling, Vol 27, pp 781-803.  
 Desai, Y.M., Popplewell, N., Shah, A.H., and Buragohain, D.N. (1988). "Geometric Nonlinear Static Analysis of Cable Supported Structures", Computers and Structures, Vol 29, pp 1001-1009.  
 Fleming, J.F. (1989). Computer Analysis of Structural Systems, McGraw-Hill Company, pp 532-544.  
 Fleming, J.F. and Egeseli, E.A. (1980). "Dynamic Behaviour of a Cable-stayed Bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 8, pp 1-16.  
 Karoumi, R. (1999). "Some Modeling Aspects in the Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Supported Bridges", Computers and Structures, Vol 71, pp 397-412.  
 Nazmy, A.S. and Abdel-Ghaffar, A.M. (1990). "Three-dimensional Nonlinear Static Analysis of Cable-stayed Bridges", Computers

- and Structures, Vol 34, pp 257-271.
- Schrefler, B.A., Odorezzi, S.Z and Wood, R.D. (1983). "A Total Lagrangian Geometrically Nonlinear Analysis of Combined Beam and Cable Structures", Computers & Structures, Vol 17, pp 115-127.
- Tezcan, S.S. and Mahapatra, B.C. (1969). "Tangent Stiffness Matrix for Space Frame Members", Journal of Structural Division(ASCE), ST6(95), pp 1257-1270.
- 
- 2004년 9월 16일 원고 접수  
2004년 10월 19일 최종 수정분 채택