

지진력을 받는 해양케이블의 동적 비선형해석

Dynamic Non-Linear Analysis of Ocean Cables Subjected to Earthquakes

김 남 일* 김 문 영** 신 현 목***
Kim, Nam Il Kim, Moon Young Shin, Hyun Mock

국문요약

이전의 연구^{(1),(2)}에서 하중증분법을 이용하여 지점 변위를 일으키고 자중, 부력, 그리고 조류력을 받는 해양케이블의 초기평형 상태를 결정하였다. 본 연구에서는 이 상태를 기준으로 동적인 지점운동 또는 지진하중에 대하여 첨가질량 및 케이블운동에 의한 Morison force를 고려한 해양케이블의 동적 비선형해석을 수행한다. 지점운동과 지진력을 받는 수중케이블에 대하여 기하학적 비선형해석을 수행하고, 해석결과와 분석을 통하여 해양케이블의 동특성을 파악한다.

주요어 : 해양케이블, 기하학적 비선형, 등매개 케이블 요소, 동적비선형 해석, 지점운동, 지진하중

ABSTRACT

In the previous paper^{(1),(2)}, a geometrically non-linear finite element formulation of spatial cables subjected to self-weights and support motions was presented using multiple noded cable elements and how to determine the initial equilibrium state of cables was addressed. In this paper, in order to perform dynamic non-linear analysis of ocean cables subjected to support motions and earthquakes, a numerical method to calculate Morison forces and incorporate effects of earthquake motions is presented based on the Newmark method. Challenging example problems are presented in order to investigate dynamic non-linear behaviors of ocean cables subjected to support motions and earthquake loadings.

Key words : ocean cable, geometric non-linearity, isoparametric cable element, dynamic non-linear analysis, support motion, earthquake force

1. 서 론

깊은 수심의 해양 환경에 접해 있는 해양 구조물을 설계할 때, 케이블의 동적 거동 해석은 설계 과정에서 가장 중요한 요소중의 하나이다. 해양 케이블은 부유식 구조물과 인양 구조물, 계류 시설물 등의 해양구조물에 폭넓게 사용되고 있는 중요한 부재이다. 이러한 케이블은 인장력의 큰 변화없이 대변위에 의한 형

상변화를 일으켜 외력에 저항하고 하중-변위관계에서 기하학적 비선형성을 수반하게 된다. 일반적으로 유체 속에서 작용하는 케이블의 가속도에 의하여 발생하는 관성력은 케이블의 고유진동수를 감소하는 효과를 발생시키며, 케이블과 유체사이의 상대속도에 의하여 발생하는 점성효과는 케이블의 강성을 증가시키며 결과적으로 고유진동수를 증가시키게 된다. 따라서 해양케이블의 해석에 있어서 케이블에 작용하는 Morison force와 지진력은 케이블의 동적해석에 결정적으로 영향을 미칠 수 있는 중요한 변수이다.

Berteaux⁽³⁾은 조류력을 받는 해양 케이블 구

* 성균관대학교 토목공학과 박사과정
** 정희원 · 성균관대학교 토목공학과 부교수
*** 정희원 · 성균관대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

조에 대하여 조류력에 의한 유체-구조물간의 상호 작용을 고려하여 케이블에 대한 평형방정식을 세우고 수치적 방법에 의하여 비선형 대수방정식의 해를 얻었다. West et al.⁽⁴⁾은 개별 케이블요소를 사용하여 수치적 방법으로 케이블 구조에 대하여 자유진동 및 진동모우드를 구하였으며, Ramberg와 Groffin⁽⁵⁾은 Irvine과 Caughey가 제안한 모델을 사용하여 팽팽한경우와 느슨한 경우에 대하여 해양케이블의 자유진동해석을 수행하여 구조물의 감쇠와 유체감쇠, 유체의 추가질량(added mass)이 케이블구조에 미치는 영향을 조사하였다. Triantafyllou⁽⁶⁾는 팽팽한 경사진 케이블에 대하여 선형 동적해석을 점근적 방법을 사용하여 유도하였으며 이 결과 복합모우드(hybrid mode)를 발견하고 이 모우드가 케이블의 동적 장력 변화에 크게 영향을 미친다는 것을 알아내었다. 또한 Yoon 과 Leonard⁽⁷⁾는 케이블의 비선형 형상을 Taylor 급수를 사용하여 선형화하고 조류력을 받는 경우의 자유진동에 관한 문제를 연구하였다. Blik과 Triantafyllou⁽⁸⁾는 파랑하중에 대하여 케이블의 동적 장력에 영향을 미치는 케이블의 비선형성의 효과 및 유체 항력 효과를 연구하였으며, Boom⁽⁹⁾은 케이블을 집중 질량을 이용하여 모델링하고 규칙파 및 비규칙파를 받는 경우에 대하여 케이블의 형상 변화와 수심 변화에 따라 케이블의 장력 변화와 동적 거동을 연구하였다. Paik⁽¹⁰⁾은 파랑하중의 비선형 점성항력이 해양구조물의 동적응답에 미치는 영향을 조사하였다.

김 등⁽²⁾은 등매개 곡선 케이블요소에 대한 접선강성행렬 및 질량행렬을 유도하고, 자중과 부력을 받고 지점변위를 일으키는 해양케이블의 초기평형상태를 결정하였다. 이 후 조류력을 받는 케이블의 평형상태를 결정하고 이 상태를 기준으로 자유진동해석을 수행하였다. 본 연구에서는 지점이동 및 지진력을 받는 해양케이블의 기하학적 비선형 문제를 풀기 위하여, Morison force와 지점운동이 고려되는 Newmark 방법에 근거한 동적 비선형 유한요

소 해석방법을 제시한다. 해석결과의 분석을 통하여 해양케이블의 동특성을 파악한다.

2. 지점운동 및 지진력을 받는 해양케이블

일반적으로 해양케이블에 작용하는 주요 설계 외력으로는 파력, 조류력, 그리고 지진력 등으로 열거할 수 있다. 본 장에서는 해양케이블의 첨가질량, 그리고 케이블에 작용하는 Morison force, 지점운동 및 지진하중을 모형화하는 방법을 생각한다. 또한 Newmark 방법에 근거하여 입력된 지진 운동의 영향이 구조물에 작용하는 등가 절점 동하중으로 계산되는 과정을 설명한다.

2.1 Morison 방정식

일반적으로 유체에 대한 단일 수직 실린더의 상대운동을 고려하는 경우에, Morison 방정식을 사용하여 단위 길이 당 실린더에 작용하는 유체작용력은 다음과 같이 관성력 F_I 과 점성항력 F_D 의 합으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 F &= F_I + F_D \\
 &= C_I A_I \dot{v} + (C_I - 1) A_I \dot{V} + C_D A_D |V| V
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 C_I 과 C_D 는 각각 관성계수, 항력계수이고, \dot{v} 와 v 는 각각 유체의 가속도 및 속도를 나타낸다. 또한 $A_I = 0.25 \pi \rho D^2$, $A_D = 0.5 \rho D$ 이고 ρ 와 D 는 유체의 밀도, 실린더의 직경을 의미한다. $V (= v - \dot{u})$ 는 상대속도, \dot{u} 는 케이블의 속도, 그리고 $C_I - 1$ 은 첨가질량 계수를 나타낸다. 식 (1)에서 관성력은 두개의 항으로 나누어지는데, 첫 번째 항은 단지 유체의 운동에 의해 발생하고 두 번째 항은 실린더의 운동이 주변의 물입자를 가속시키는 영향인 부가질량(added mass)항이 된다. 세 번째 항은 물입자와 실린더의 상대 속도에 의존하는 점성항력을 표현한다.

파력을 받는 경우에 경사진 케이블의 법선 및 접선방향의 항력성분을 고려하면 Morison 방정식은 다음과 같이 벡터성분으로 나타낼 수 있다(그림 1 참조).

$${}^tF_i = C_l A_l {}^t v_i^N - (C_l - 1) A_l {}^t \ddot{u}_i^N + C_D^N A_D |{}^t V^N| {}^t V_i^N + C_D^T A_D |{}^t V^T| {}^t V_i^T \quad (2)$$

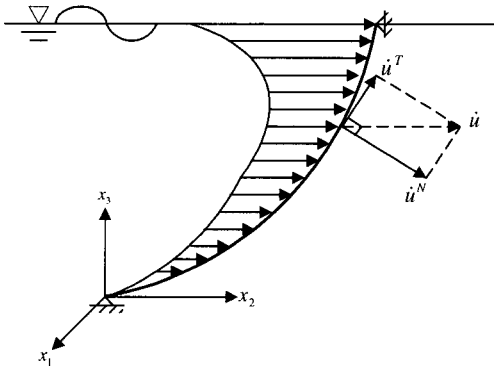


그림 1 Wave forces acting on the curved ocean cable

여기서 C_D^N 과 C_D^T 는 각각 법선 및 접선방향의 항력계수를 나타낸다. 유체가 정지상태에 있고 케이블의 유한한 속도 및 가속도로 움직일 때 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}^tF_i = -(C_l - 1) A_l {}^t \ddot{u}_i^N - C_D^N A_D |{}^t \dot{u}^N| {}^t \dot{u}_i^N - C_D^T A_D |{}^t \dot{u}^T| {}^t \dot{u}_i^T \quad (3)$$

여기서 첫 번째 항은 첨가질량에 포함되며 질량행렬 산정 시 고려하여야 할 사항은 본 절에서 다룬다. 두 번째와 세 번째 항은 각각 점성항력의 법선 및 접선방향성분을 표시하며 비선형 항에 해당한다. 따라서 동적 비선형해석에서는 아래의 내용과 같이 고려되지만, 선형해석에서는 이 항들은 무시된다. 또한 왼쪽 윗첨자는 동적해석시 시간 t에서의 크기를 나타낸다.

식 (3)에서 보는 바와 같이 유체가 거의 정지한 경우도 구조물이 동적운동을 일으키면 Morison force가 발생한다. 지점운동을 받는

해양케이블이 대변위를 일으키는 경우에 단위 길이 당 Morison force를 산정하는 절차는 다음과 같다.

- 1) 항력계수와 관성계수를 결정한다.
- 2) 총변위를 고려하여 각 절점의 현재좌표 (current coordinate)를 산정하고, isoparametric interpolation을 이용하여 가우스 적분점에서 단위접선벡터 ${}^t t$ 를 산정한다.
- 3) 각 절점에서 케이블의 속도, 가속도벡터를 결정하고, isoparametric interpolation을 이용하여 가우스 점에서 케이블의 속도(${}^t \dot{u}_i$)를 구한다.
- 4) 2)와 3)의 결과를 이용하여 가우스 점에서 접선 및 법선방향의 벡터성분을 산정한다. 아래는 속도의 접선 및 법선성분을 계산하는 식을 나타낸 것이다.

$${}^t \dot{u}_i^T = ({}^t \dot{u} \cdot {}^t t) {}^t t_i, \quad {}^t \dot{u}_i^N = {}^t \dot{u}_i - {}^t \dot{u}_i^T \quad (4)$$

- 5) 가우스 수치적분법을 이용하여 식 (5)를 산정함으로써, 점성항력에 대응하는 등가 절점하중을 구한다.

$$\delta W = - \int_0^l [C_D^N A_D |{}^t \dot{u}^N| {}^t \dot{u}_i^N + C_D^T A_D |{}^t \dot{u}^T| {}^t \dot{u}_i^T] \delta u_i {}^t ds = {}^t R \delta U \quad (5)$$

첫 번째 반복계산단계에서 증분하중 ($= {}^{t+\Delta t}R - {}^tR$)을 산정하는 경우에 변형된 상태(deformed state)에 대응하는 케이블의 속도, 가속도를 알 수 없으므로 영 벡터로 간주하지만, 이후의 반복계산에서 불평형하중을 산정할 때 식 (5)에서 얻어지는 값을 엄밀히 고려하게 된다.

한편, 첨가질량의 영향을 고려한 질량행렬의 산정방법은 다음과 같다.

- 1) 케이블요소에 대하여 첨가질량에 대응하는 관성력 항은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$${}^tF_i = -(C_I - 1) A_I {}^t\ddot{u}_i^N$$

$$= -(C_I - 1) A_I [{}^t\ddot{u}_i - {}^t\ddot{u}_i^T] \quad (6)$$

2) 가우스 점에서 단위접선벡터(${}^t t_i$)를 고려하면 케이블의 접선방향 가속도성분은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$${}^t\ddot{u}_i^T = ({}^t\ddot{u} \cdot {}^t t) {}^t t_i \quad (7)$$

3) 식 (6)에 대응하는 첨가질량행렬 M_e^* 을 산정하는 방법은 등가의 점성항력을 구하는 과정과 유사하며, 결과 식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M_e^* = (C_I - 1) \int_{-1}^{+1} \rho A H^T (I_3 - {}^t T) H J dr \quad (8)$$

여기서 A와 H는 각각 등매개 케이블요소⁽¹⁾의 단면적과 보간함수행렬(interpolation function matrix)이다. 또한 T는 3×3 행렬이며 각 성분은 ${}^t T_{ij} = {}^t t_i {}^t t_j$ 로 산정한다.

2.2 지점운동 및 지진력을 받는 해양케이블의 증분 운동방정식

지점운동 또는 지진력을 받는 해양케이블의 동적 비선형해석이 이루어지기 위해서는, 먼저 자중, 부력 및 지점변위에 의한 초기평형상태를 결정하여야 한다. 자중, 지점이동 등을 고려한 케이블의 기하학적 비선형 해석법은 이전의 연구^{(1),(2)}를 참조할 수 있다. 추가적으로 지진력의 영향을 고려하는 경우에 직접강도법에 의하여 해양 케이블에 대한 증분 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M {}^{t+\Delta t} \ddot{U} + C {}^{t+\Delta t} \dot{U} + {}^t K_T \cdot \Delta U = {}^{t+\Delta t} R - {}^t F \quad (9)$$

여기서 M은 첨가질량을 포함하는 케이블의 질량행렬이며 구체적인 계산방법은 2.1 절을

참조할 수 있다. C는 감쇠행렬이며 Rayleigh damping으로 가정한다. ${}^t K_T$ 는 선형 및 비선형 강성행렬의 합으로 구성되는 접선강성행렬이다. ${}^t F$ 는 구조물의 내력으로 인한 절점력벡터를 나타낸다. ${}^{t+\Delta t} R$ 은 외력을 나타내며, 케이블의 운동으로 인한 Morison force의 등가 절점하중 산정법은 2.1 절에 제시하였다. 그리고 ${}^t \ddot{U}$, ${}^t \dot{U}$, ΔU 는 각각 케이블구조의 가속도, 속도, 그리고 증분변위벡터를 나타낸다.

식 (9)를 이용하여 동적 선형 및 비선형해석을 수행하기 위한 Newmark 방법은 문헌⁽⁵⁾을 참조할 수 있다. 식 (9)로부터 Newmark의 가정에 따른 증분방정식은 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$({}^t K_T + a_0 M + a_1 C) \Delta U = {}^{t+\Delta t} R - {}^t F$$

$$+ C(a_4 {}^t \dot{U} + a_5 {}^t \ddot{U}) + M(a_2 {}^t \dot{U} + a_3 {}^t \ddot{U}) \quad (10a)$$

여기서

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}$$

$$a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1, \quad a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, \quad a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$$

$$\delta \geq 0.50, \quad \alpha \geq 0.25 (0.5 + \delta)^2 \quad (10b)$$

지점변위를 일으키는 케이블의 동적 해석 알고리즘을 개발하기 위하여, 먼저 특정 변위 성분에 대한 구속조건 ($U_k = U_k^*$)을 갖는 선형 구조계의 총 에너지를 생각한다.

$$\Pi = \frac{1}{2} U^T K U - U^T R \quad (11)$$

Penalty method를 적용하는 경우에 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi = \frac{1}{2} U^T K U - U^T R + \frac{\alpha}{2} (U_k - U_k^*)^2 \quad (12)$$

여기서 α 는 상대적으로 매우 큰 값 ($\alpha \gg k_{ii}$)

을 나타내며, 식 (12)의 변분을 취하면 다음 식을 얻는다.

$$\delta U^T K U - \delta U^T R + \alpha (U_k - U_k^*) \delta U = 0 \quad (13)$$

이 식을 행렬식의 형태로 표현하면 아래와 같다.

$$(K + \alpha e_k e_k^T) U = R + \alpha U_k^* e_k \quad (14)$$

여기서 e_k 는 k 번째 성분만 1이고 나머지는 영인 벡터이다. 이 식은 k 번째 자유도에 α 크기의 스프링이 설치되어 k 번째 변위성분이 U_k^* 이 계산되도록 k 번째 자유도에 αU_k^* 의 하중을 재하시킨 것으로 해석할 수 있다. α 값이 시스템의 다른 강성에 비하여 월등히 크기 때문에, 연립방정식 (14)를 풀면 변위구속조건 ($U_k = U_k^*$)과 외력에 대응하는 해를 얻을 수 있다.

이제 식 (15)와 같이 특정 변위성분이 지점 운동 또는 지진운동을 일으키는 경우를 생각한다.

$$U_k = U_k^*(t) \quad (15)$$

특정 변위가 지점변위를 일으키고 Morison force를 고려하는 경우에, 선형정적해석에서 사용되는 penalty method의 개념을 확장시켜서 반복계산에 의하여 해양케이블의 동적 비선형해석을 수행하는 방법은 다음과 같다.

- 1) 이전의 연구^{(1),(2)}에서 제시된 정적 비선형해석법을 이용하여 부력을 포함한 자중, 조류력, 그리고 지점이동을 받는 해양케이블의 초기평형상태를 구한다.
- 2) 식 (10)과 (14)를 생각하되, 첫번째 반복계산시 ($i = 1$) 특정 증분변위의 구속조건 ($\Delta U_i = \Delta U_i^*$)과 Morison 식에 의한 증분력이 영이라는 조건을 고려하여 다음의 연립방정식의 해를 구한다.

$$\begin{aligned} & ({}^t K_T^{(1)} + \alpha e_k e_k^T + a_0 M + a_1 C) \Delta U \\ & = \alpha \Delta U_k^* e_k + M (a_2 {}^t \dot{U} + a_3 {}^t \ddot{U}) \\ & + C (a_4 {}^t \dot{U} + a_5 {}^t \ddot{U}) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서

$$\Delta U_k^* = U_k^*(t + \Delta t) - U_k^*(t) \quad (17)$$

- 3) 첫번째 반복계산시, 증분변위로부터 케이블 각 절점의 속도벡터 ${}^{t+\Delta t} \dot{U}^{(1)}$ 를 산정하고, 이 값을 이용하여 식 (5)로 부터 Morison force를 산정한다. 그리고 특정변위의 스프링력 ($= \alpha U_k^*(t + \Delta t) e_k$)을 구하고 두 힘 벡터의 합으로 총 외력 ${}^{t+\Delta t} R^{(1)}$ 을 산정한다.
- 4) 케이블요소의 부재력과 스프링력의 합으로 총부재력 ${}^{t+\Delta t} F^{(1)}$ 을 산정한다. 2)의 결과를 이용하여 아래의 식으로 불평형 하중벡터 ${}^{t+\Delta t} \hat{R}^{(1)}$ 를 산정한다.

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t} \hat{R}^{(1)} &= {}^{t+\Delta t} R^{(1)} - M {}^{t+\Delta t} \ddot{U}^{(1)} \\ &- C ({}^{t+\Delta t} \dot{U}^{(1)} - {}^{t+\Delta t} F^{(1)}) \end{aligned} \quad (18)$$

- 5) i 번째 반복계산시 ($i > 1$), 특정변위의 추가적인 증분이 영인 조건을 고려한 증분방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & ({}^t K_T^{(i)} + \alpha e_k e_k^T + a_0 M + a_1 C) \Delta U \\ & = {}^{t+\Delta t} \hat{R}^{(i)} \end{aligned} \quad (19)$$

- 6) i 번째 반복계산시, 특정 변위성분이 $U_k^*(t + \Delta t)$ 로 유지된다는 조건이외에는 2)와 3) 단계의 계산과 동일한 과정을 거쳐서 불평형 하중벡터 ${}^{t+\Delta t} \hat{R}^{(i)}$ 를 산정한다.
- 7) 수렴조건을 만족하는지 검사하고, 그렇지 않으면 수렴할 때까지 반복계산한다.

지점운동 또는 지진력을 받는 해양케이블의 동적 선형해석법을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 자중, 부력, 그리고 지점이동을 받는 해양케

이블의 초기평형상태를 구한다.

- 2) 초기평형상태에 대응하는 케이블의 접선강도행렬과 첨가질량을 고려한 질량행렬을 산정한다.
- 3) 시스템행렬을 고정시키고 확장된 penalty method와 Newmark method를 적용하여 지점운동 또는 지진운동을 받는 해양케이블의 동적 선형응답을 얻는다.

3. 수치해석 예

이전의 연구^{(1),(2)}에서 케이블을 등매개 케이블 요소로 모델링하고 하중중분법을 적용하여, 케이블의 자중과 부력 및 지점변위를 받고 이후 조류력을 받는 해양케이블의 정적 평형상태를 찾는 해석법을 제시하고 자유진동특성을 조사하였다. 본 연구에서는 정적 평형상태를 기준으로 지점운동 또는 지진력을 받는 해양케이블의 동적 선형 및 비선형해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 하중중분법을 적용할 때 자중과 부력 및 지점변위를 20 단계로 분할하여 재하(在荷)시켰으며, 해양케이블 해석을 위한 초기 형상은 각 부재를 무응력상태로 펼쳐서 직선으로 해서 바닥면상에서 연결하는 구조로 생각한다. 동적해석시 Newmark method를 사용하였으며, 0.01초의 시간간격(Δt)을 적용하였다.

3.1 지점 운동을 일으키는 경사진 케이블의 동적 해석

케이블의 기하학적 비선형성의 정도를 파악하기 위하여 경사각의 변화, 즉 팽팽한(taut) 케이블과 느슨한(slack) 케이블에 대하여 선형 및 비선형해석을 수행한다. 그림 2는 지점 운동을 일으키는 경사진 케이블의 형상을 보여주고 있으며 지점 1에 진폭이 0.5m이고 케이블의 경사각이 30°, 45°, 60°에 대하여 각진동수 ω 를 각각 0.80, 0.42, 0.38 rad/sec를 가지는 주기 함수를 X 방향으로 가한다. 이 경우 가해진 각진동수는 케이블의 자유진동해석시 계산된 첫 번째 고유진동수를 나타낸다. 사용된 케이블의 제원은 표 1에 표시하였으며 그

림 3은 지점 운동을 일으키는 경사진 케이블에 대하여 경사각의 변화에 따른 케이블 중앙점의 X 방향의 변위를 도시한 것이다.

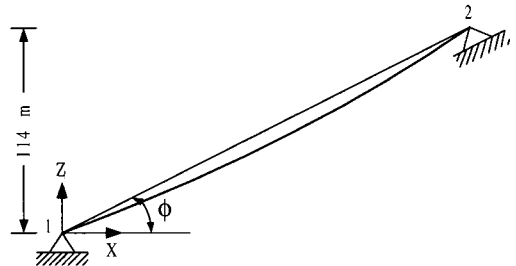
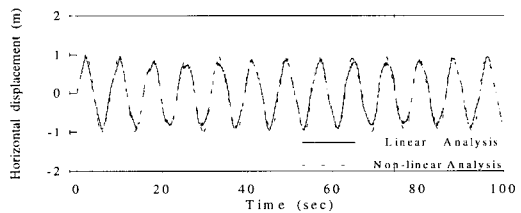


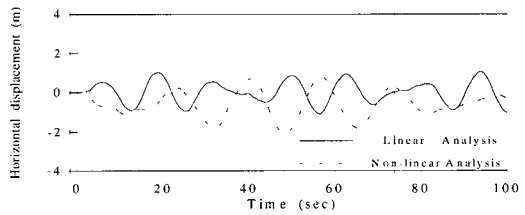
그림 2 지점 운동을 일으키는 경사진 케이블

표 1 경사진 케이블의 제원

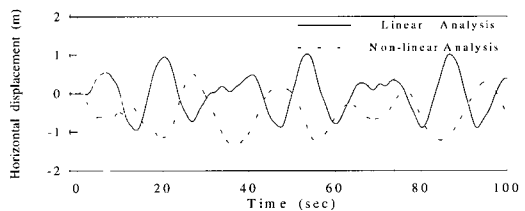
케이블 : 초기길이 $L=229\text{m}$
$A=3.183 \times 10^{-3}\text{m}^2$
$D=0.0637\text{m}$
$E=2.4345 \times 10^{11}\text{N/m}^2$
공기중 단위 길이당 무게 $W_a=91.196\text{N/m}$



(a) 경사각 30°



(b) 경사각 45°



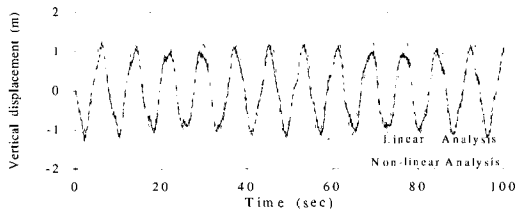
(c) 경사각 60°

그림 3 지점 변위를 받는 경사진 케이블의 X 방향 동적 변위

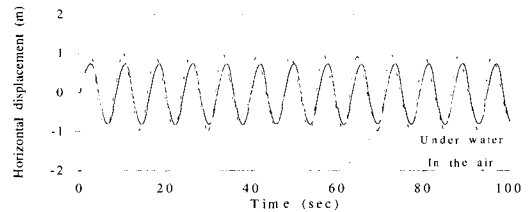
그림 3의 (a)에서 볼 수 있듯이 케이블의 경사각이 30°, 즉 팽팽한(taut) 경우에 케이블의 기하학적 비선형효과는 크게 나타나지 않는다. 반면 그림 (b)와 (c)에서는 케이블의 비선형성이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 케이블의 자중은 -Z 방향으로 작용하고 그림 2의 케이블의 형상을 생각한다면 지점 운동을 일으키는 경우에 케이블은 +X 방향으로 보다 강성이 증가하게 되며 -X 방향으로는 강성이 줄어들게 된다. 결과적으로 케이블의 기하학적 비선형성을 고려하면 -X 방향으로 변위가 크게 발생할 것이며 +X 방향으로는 변위가 줄어들게 된다. 또한 그림 4에서는 케이블 중앙점의 Z 방향 변위를 보여주고 있다. X 방향 변위와 유사하게 경사각이 30°의 경우(a) 케이블의 비선형효과는 크게 나타나지 않지만 경사각이 보다 커질수록 즉 보다 느슨할수록 비선형성은

크게 나타나며 -Z 방향으로 강성이 증가하고 +Z 방향으로 강성이 감소하는 것을 볼 수 있다.

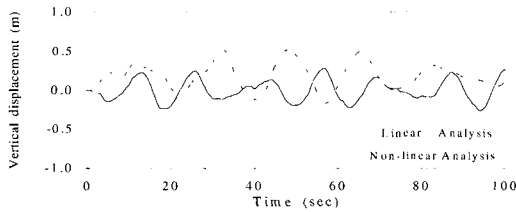
다음으로 비선형 해석시 수중에서 지점 운동을 일으키는 케이블의 동적 거동을 조사하므로써 수중에서의 공기중에서의 케이블의 거동을 비교하기로 한다. 이 경우 부력을 받는 케이블의 자중 $W_w=61.315\text{N/m}$ 이며 수직항력 계수, 접선항력계수, 그리고 관성계수는 각각 $C_N=1.2$, $C_T=0.05$, $C_I=2.0$ 이다. 그림 5와 6에서는 경사각이 각각 30°, 45°, 60°의 경우 수중에서와 공기중에서 지점운동을 받는 케이블 중앙점의 X 방향 및 Z 방향 변위를 보여주고 있다. 공기중에서와는 달리 수중에서는 케이블의 질량에 부가적으로 추가질량이 더해지므로 진폭이 현저하게 줄어들게 되는 것을 볼 수 있다.



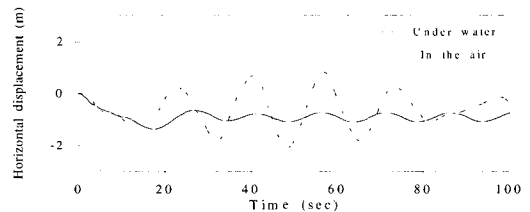
(a) 경사각 30°



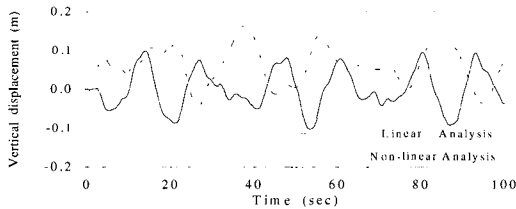
(a) 경사각 30°



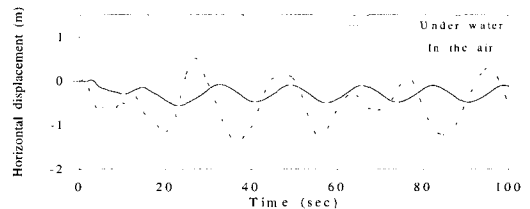
(b) 경사각 45°



(b) 경사각 45°



(c) 경사각 60°



(c) 경사각 60°

그림 4 지점 변위를 받는 경사진 케이블의 Z 방향 동적 변위

그림 5 수중과 공기중에서의 지점 변위를 받는 경사진 케이블의 X 방향 동적 변위

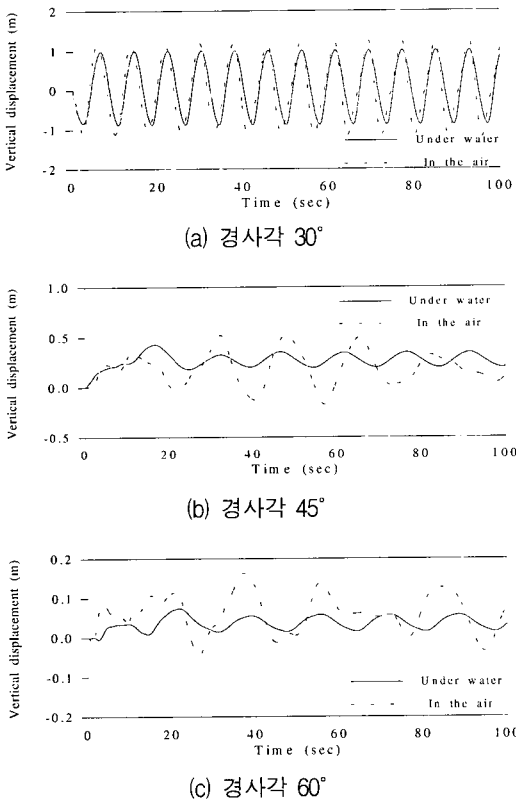


그림 6 수중과 공기중에서의 지점 변위를 받는 경사진 케이블의 Z 방향 동적 변위

3.2 지진 하중을 받는 경사진 케이블의 동적 해석

본 예제에서는 앞에서 전개한 지점 운동을 일으키는 경사진 케이블의 동적거동을 보다 실제적인 문제로 확장시켜 실제 지진하중을 받는 경사진 해양 케이블에 대하여 지진하중이 케이블의 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악한다. 그 예로서 지진하중 발생시 케이블의 거동에 대하여 공기 중에서 선형 해석과 비선형 해석을 수행하여 케이블의 비선형성의 정도를 파악하고 수중에서의 거동을 조사하므로써 케이블에 작용하는 유체의 영향을 알아보도록 한다. 사용된 지진하중은 1940년 미국 California 에서 발생한 El Centro 지진으로 그림 7에서는 시간에 따른 지반가속도를 나타내고 있다. 케이블의 계원은 상기 예제와 동일하며 경사각은 45°이고 해양 케이블은 10개의

4절점 등매개 요소로 모델링 하였다.

그림 8은 선형 해석과 비선형 해석시 시간 50초 동안 케이블 중앙점의 X 방향(a) 및 Z 방향(b) 변위를 나타낸다. 그림에서도 볼 수 있듯이 앞의 예제인 harmonic 지점 운동을 일으키는 케이블의 거동과 유사하게 지진하중 발생시 케이블은 -X 방향과 +Z 방향으로 강성이 감소하고 결과적으로 변위가 증가하는 것을 알 수 있다.

또한 그림 9는 수중에서의 공기중에서의 케이블 중앙점의 변위를 나타낸다. 수중에서의 케이블의 거동은 케이블에 작용하는 유체의 추가질량효과와 케이블의 속도에 의하여 발생하는 항력효과에 의하여 변위의 진폭이 감소하는 것을 볼 수 있다.

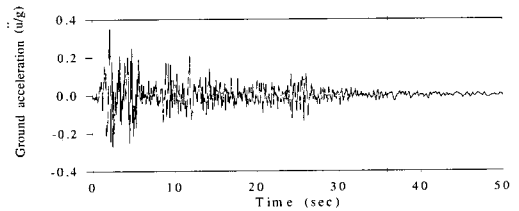


그림 7 El Centro 지반 가속도

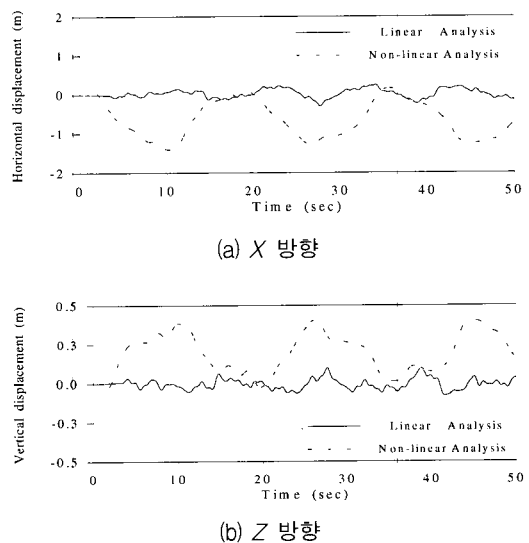
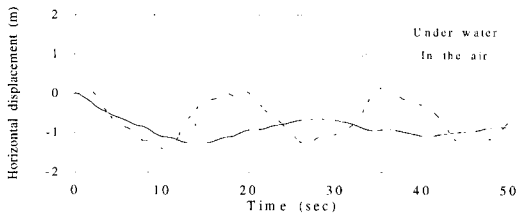
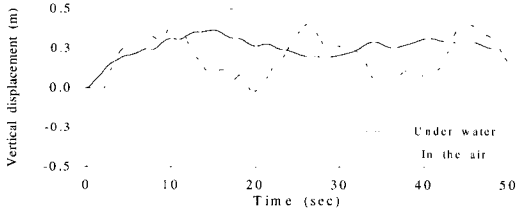


그림 8 공기중에서의 지진 하중을 받는 경사진 케이블의 동적 변위



(a) X 방향



(b) Z 방향

그림 9 지진 하중을 받는 경사진 케이블의 동적 변위

4. 결 론

지점이동 및 지진력을 받는 해양케이블의 기하학적 비선형 문제를 풀기 위하여, Morison force와 지점운동이 고려되는 Newmark 방법에 근거한 동적 비선형 유한요소 해석방법을 제시하였다. 해석결과와 분석을 통하여 해양케이블의 동특성을 파악한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 케이블의 기하학적 비선형효과는 느슨할수록 크게 나타나며 연직 하향방향으로 강성이 증가하고 연직 상향방향으로 강성이 감소하는 경향을 볼 수 있다.
2. 지점운동을 받는 케이블의 동적 해석의 경우에, 공기중에서의 경우와 비교하여 수중에서는 케이블의 질량에 부가적으로 추가질량이 더해지므로 진폭이 현저하게 줄어들게 되는 것을 볼 수 있다.
3. 또한, 지진하중을 받는 해양케이블의 경우에도 공기중과 비교하여 수중에서의 케이블의 거동은 케이블에 작용하는 유체의 추가질량효과와 케이블의 속도에 의하여 발생하는 점성항력효과에 의하여 변위의 진

폭이 감소하는 것을 볼 수 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가 연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술 개발 사업으로 수행된 것이다.

참 고 문 헌

1. 김문영, 김남일, "등매개 케이블요소를 이용한 케이블망의 정적 및 동적 비선형해석", 한국전산구조공학회 논문집, 11권 2호, 1998, pp. 305-316.
2. 김문영, 김남일, 윤종윤, "조류력을 받는 해양케이블의 자유진동해석", 한국해양해양공학회 논문집, 1999. 4, (심사중).
3. Berteaux, H. O., *Buoy Engineering*, John Willey and Sons, New York, N. Y., 1976.
4. West, H. H., Geschwindner, L. F., and Suhoski, J. E., "Natural vibrations of suspension cables," *Journal of the Structural Division*, Vol. 101, 1975, pp. 2266-2291.
5. Ramberg, S. E. and Griffin, O. M., "Free vibrations of taut natural vibrations of suspension cables," *Journal of the Structural Division*, Vol. 101, 1975, pp. 2266-2291.
6. Triantafyllou, M. S. "The dynamics of taut inclined cables," *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 37, 1984, pp. 421-440.
7. Yoon, T. Y. and Leonard, J. W., "Natural vibration of cables in a flowing fluid," *University Research Initiative Report No. OE-87-52 Office of Naval Research*, 1987.
8. Blik, A. and Triantafyllou, M. S., "Nonlinear cable dynamics," *Proceedings of the 4th Inter-*

- national Conference on Behaviour of Offshore Structure(BOSS '85)*, 1985, pp. 963-972.
9. Van den Boom, H. J. J., "Dynamics behaviour of mooring lines," *Proceedings of the 4th International Conference on Behaviour of Offshore Structure(BOSS '85)*, 1985, pp. 359-368.
10. Paik, I., "Nonlinear dynamic behavior of offshore structures," *A National Science foundation Engineering Research Center*, 1994.