

수중세장체의 접촉응답해석 기법에 관한 연구

김형우* · 홍섭* · 최종수* · 여태경*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Study on the Contact Response analysis Technique of Marine Slender Structure

Hyung-woo. Kim* · Sup. Hong* · Jong-su. Choi* · Tae-kyeong. Yeu*

*Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

요 약 : 수중세장체의 동적거동 해석시, 세장체간의 접촉, 세장체와 지면의 접촉이 흔히 포함된다. 본 논문에서는 접촉모델의 동적거동 해석을 위해 효율적이고 일반적인 접촉알고리즘을 다루고 있다. 절대좌표계에서 시스템의 경계상자를 만들고, 그것을 세분화하여 접촉감지에 사용하는 전역 감지 기술이 제안되었다. 접촉 감지의 횟수, 즉 접촉 감지 시간이 다른 방법에 비해 작다는 것이 이 방법의 장점이다. 개발된 효율적인 접촉 감지 알고리즘을 3차원 비선형 세장체 해석 프로그램에 적용하였으며, 몇 가지 수치예제를 통하여 제안된 방법의 효율성을 검증하였다.

핵심용어 : 수중세장체, 동적거동, 접촉, 경계상자, 전역감지, 절대좌표계

ABSTRACT : Dynamic analysis of a marine slender structure is often involved with contacts among bodies or between bodies and seafloor. This paper presents an efficient and general contact search algorithm for dynamics in the context of the compliance contact model. A global detecting method that a bounding box is divided into several pieces in global coordinate system is presented in this paper. The method has an advantage that the number of contacting searching can be smaller than other methods for a system. The developed an efficient contact search algorithm is applied to the simulation program of 3D nonlinear dynamics of slender structure. Some examples are presented to show the validity of the proposed method.

KEY WORDS : marine slender structure, dynamic analysis, contact, boundary box, global detecting, global coordinates

1. 서 론

로프, 체인, 파이프, 케이블, 라이저 등 해양세장체로 분류되는 단면에 비하여 길이가 긴 구조물들은 외력작용에 대한 대 변위 응답을 특징으로 한다. 작업 목적에 따라서 구조물의 형상의 기하학적 비선형성이 커지는 경우에는 구조물의 유연성이 더욱 증가됨으로써 대 변위 응답 특성은 강화된다. 이러한 예는 해저석유 생산을 위한 유연라이저(flexible riser), 심해용 무인잠수정 케이블, 심해저 자원 채광시스템 등에서 더욱 두드러진다.

이와 같은 세장체의 과도응답에 의한 3차원 거동 해석에는 오일러 각(Euler angles)이 가장 흔히 사용되어 왔다(Bernitsas, 1982; Patrikalakis, 1986; Hong, 1992, 1997). 강체 운동학 분야에서 오래 전부터 연구된 오일러 각 또는 Bryant 각(Goldstein, 1980)은 물체

의 회전을 설명하는데 편리하지만, 물체의 회전운동을 기술하는데 특이(singular) 방향각을 내포하며, 삼각함수의 계산 양이 많은 단점이 있다. 이러한 이유로 비행체역학, 다물체 동역학 분야에서는 오일러 매개변수(Euler parameters)의 사용이 선호되고 있다(Haug, 1989). 4개의 오일러 매개변수를 사용하여 공간상 물체가 가지는 3개의 회전 자유도를 표현하므로, 4개의 오일러 매개변수들은 서로 독립적이지 않고 구속조건(normalization constraint)을 가지고 있다. 이는 오일러 매개변수 사용상의 어려움이 되어 왔다. 배대성(1994)은 오일러 매개변수의 구속조건을 연속적인 교정방법을 이용하여 만족시키는 방법을 제안하였다. Hong et. al(2003)은 오일러 매개변수를 이용한 수중세장체의 비선형 거동해석 기법을 개발하였다. 접촉감지기술은 접촉역학을 다루는 기계공학에서 보다는 그래

*대표저자 : 김형우, guddn@moeri.re.kr 010)9404-4601

픽스(Graphics)나 게임에 관련이 있는 컴퓨터 사이언스(computer science)분야에서 더 많은 관심을 가지고 발전해 왔다(Johnson, 1985). 1990년대 이 후부터는 접촉역학의 수학적 모델에 관심을 가지기 시작하면서 접촉감지기법과 접촉 및 마찰력의 근사화적 계산 방법 등이 연구의 주류를 이루었다. Lankarani(1992)는 Hertzian 접촉 이론을 근거로 하여 컴플라이언트(Compliant)접촉 모델을 제안하였다. Lozano and Perez(1983)는 로봇의 운동을 계획하기 위해 여러 강체를 하나의 형태 공간(Configuration space)으로 표현하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 3차원 수중세장체와 지면의 접촉에 대한 효율적인 접촉감지 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 알고리즘을 이용하여 기존의 방법과 비교하여 그 효율성을 검증하였다. 아울러 개발된 알고리즘을 수중세장체의 비선형 거동 해석 기법(Hong et al., 2003)에 적용하였다.

2. 기구학적 관계식

본 논문에서는 Fig. 2.1과 같이 두 개의 직교좌표계, 공간에 고정된 좌표계(X, Y, Z)와 바다에 고정된 좌표계(x, y, z),를 사용하였다. 본 논문에서는 두 좌표계사이의 관계식(변환행렬)에 오일러 매개변수를 사용하였으며, 그 표현은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = 2 \begin{bmatrix} e_0^2 + e_1^2 - \frac{1}{2} & e_1 e_2 - e_0 e_3 & e_1 e_3 + e_0 e_2 \\ e_1 e_2 + e_0 e_3 & e_0^2 + e_2^2 - \frac{1}{2} & e_2 e_3 - e_0 e_1 \\ e_1 e_3 - e_0 e_2 & e_2 e_3 + e_0 e_1 & e_0^2 + e_3^2 - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 4개의 오일러 매개변수(e_0, e_1, e_2, e_3)는 회전 각(χ)와 회전 축(\mathbf{u})에 의해 정의되어 진다(Fig. 2).

$$e_0 = \cos \frac{\chi}{2}, \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \mathbf{u}, \sin \frac{\chi}{2} \quad (3)$$

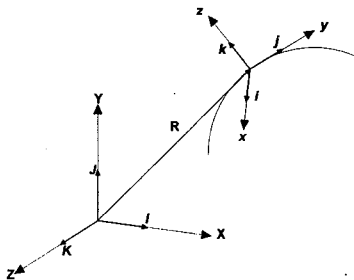


Fig. 1 Reference frames

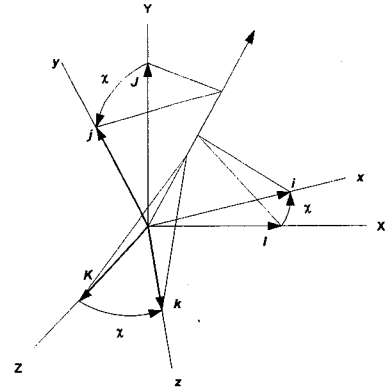


Fig. 2 Euler rotation of reference frames

3. 지배방정식

4개의 오일러 매개변수를 이용하여 해저 세장체의 3차원 비선형 동역학의 지배방정식은 다음과 같이 구성되어 진다(Hong et al., 2003).

3.1 Kinematic compatibility conditions

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i1} = \dot{\epsilon} \quad (4.a)$$

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i2} = (1 + \epsilon) \omega_3 \quad (4.b)$$

$$\sum_{i=1}^3 \dot{x}_i a_{i3} = -(1 + \epsilon) \omega_2 \quad (4.c)$$

여기서 a_{ij} 는 식(2)의 변환행렬의 (i,j)번째의 성분을 나타내고, x_i 는 각 요소의 위치($i=1,2,3$), ϵ 은 축 방향의 스트레인, ω_i 는 국부 각속도($i=1,2,3$)를 나타낸다.

3.2 Constitutive relations

$$q_{1e} = (EA\epsilon + \zeta A\dot{\epsilon}) + (1 - 2\nu)(p_0 A_0 - p_1 A_1) \quad (5.a)$$

$$r_1 = GJ_{11}\kappa_1 \quad (5.b)$$

$$r_2 = GJ_{22}\kappa_2 \quad (5.c)$$

$$r_3 = GJ_{33}\kappa_3 \quad (5.d)$$

여기서 E는 재료의 탄성계수, G는 재료의 전단계수, A는 구조물의 단면적, J는 관성모멘트, r_i 는 비틀림과 굽힘 모멘트, κ_i 는 곡률, ν 는 포아송 비를 나타낸다.

3.3 Force equilibrium conditions

$$m_1^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i1} = q_{1e} - \kappa_3 q_2 + \kappa_2 q_3 + w_e a_{21} + f_{e1} \quad (6.a)$$

$$m_2^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i2} = q_2 - \kappa_3 q_1 + \kappa_1 q_3 + w_e a_{22} + f_{e2} \quad (6.b)$$

$$m_3^* \sum_{i=1}^3 \ddot{x}_i a_{i3} = \dot{q}_3 - \kappa_2 q_1 + \kappa_1 q_2 + w_e a_{23} + f_{e3} \quad (6.c)$$

여기서, m_i^* 는 질량, w_e 는 단위길이당 무게, q_i 는 내부 전단력, f_{ei} 는 외부력이다.

3.4 Moment equilibrium conditions

$$J_{11}^* \dot{\omega}_1 + (J_{33}^* - J_{22}^*) \omega_2 \omega_3 = r_1' - \kappa_3 r_2 + \kappa_2 r_3 \quad (7.a)$$

$$J_{22}^* \dot{\omega}_2 + (J_{11}^* - J_{33}^*) \omega_1 \omega_3 = r_2' - \kappa_3 r_1 - \kappa_1 r_3 - q_3 \quad (7.b)$$

$$J_{33}^* \dot{\omega}_3 + (J_{22}^* - J_{11}^*) \omega_1 \omega_2 = r_3' - \kappa_2 r_1 + \kappa_1 r_2 + q_2 \quad (7.c)$$

여기서, J_{ii} 는 관성 모멘트, r_i 는 비틀림과 굽힘 모멘트이다.

3.5 External force

외부 유체로부터 구조물에 작용하는 유체력은 변형 Morison 방정식을 이용하였으며, 그 표현은 다음과 같다(e.g. Chai et al., 2002).

$$f = \frac{\rho_w}{2} \frac{D_0}{\sqrt{1+\epsilon}} (C_{dn} |v_n| v_n + \pi C_{dt} |v_t| v_t) \quad (8)$$

여기서, v_t 와 v_n 은 접선과 법선 속도이며, C_{dt} , C_{dn} 는 접석과 법선 항력계수를 나타내며, D_0 는 구조물의 외경을 나타내며, ϵ 은 축방향의 스트레인을 나타낸다.

접촉지점에서 발생하는 접촉력은 지면에 수직으로 작용하는 수직반력과 해저면의 접선방향으로 작용하는 마찰력으로 구분할 수 있다. Fig. 3은 접촉지점에서의 평형상태를 도시적으로 보여 주고 있다. 접선 마찰력 F_{cf} 는 수직반력에 비례하며, 다음과 같이 표현된다.

$$F_{cf} = k_f F_{cr} \quad (9)$$

여기서, k_f 는 해저면의 마찰계수를 나타낸다.

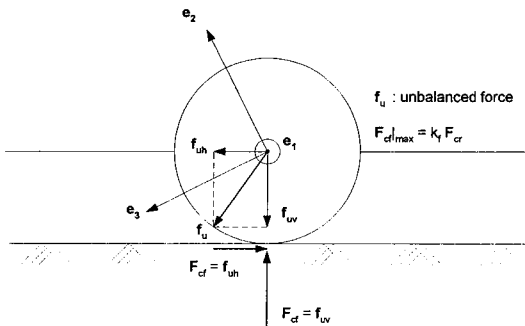


Fig. 3 Equilibrium state at a contact point

4. 효율적인 접촉감지법

Fig. 4 처럼 접촉하는 한 쌍의 바디를 가정해 보자. 여기서 j 바디를 접촉에 있어서 기준이 되는 접촉 기준 바디(defense body)로 정의하자. 좌표계 $x'_c - y'_c$ 는 접촉 기준 바디에 부착되어 있는 접촉 기준 좌표계(Contact reference frame)이다. 접

촉 기준 좌표계는 바디 위의 모든 점들을 이 좌표계에서 바라 볼 때 그 거리 벡터의 모든 성분이 항상 양의 값을 가질 수 있도록 정의해야 한다. 그 이유는 거리 지수를 계산할 때, 지수가 항상 양의 값을 가지게 하기 위해서이다.

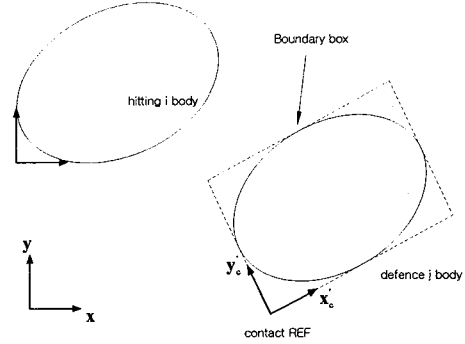


Fig. 4 Contact base body & reference frames

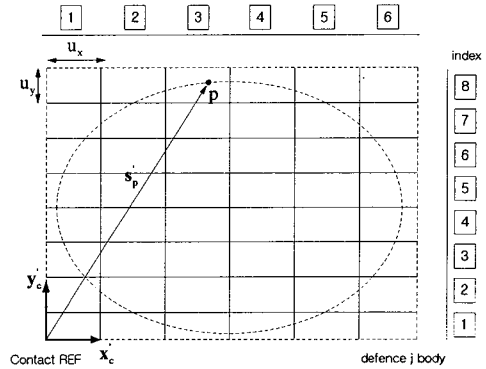


Fig. 5 Boundary box & distance index

Fig. 5는 접촉 기준 바디에 속한 점들에 대한 거리 벡터를 지수화하는 방법을 보여 주고 있다. 먼저 경계상자를 일정한 해상도를 유지하도록 Fig. 5와 같이 구역을 나눈다. 그리고 난 다음 접촉 기준좌표계에서 특정 점까지의 거리 벡터와 해상도를 가지는 거리 지수(distance index), I_k 을 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$I_k = \text{INT} \left(\frac{s_{p,k}}{u_k} \right) + 1, (k = 1, 2) \quad (10)$$

여기서 INT는 어떤 실수 값을 정수로 만드는 함수이며, k 는 접촉 기준 좌표계의 x 축과 y 축을 의미한다. 또, $s_{p,k}$ 는 접촉 기준좌표계에서 바라본 어떤 점의 거리 벡터이며, u_k 는 각 방향에 대한 해상도이다. 접촉 기준 바디의 모든 점들을 식(10)을 이용해서 지수화한다. 여기서 계산된 지수는 점들의 정보를 담고 있는 메모리의 주소(CELL)가 된다. 예를 들어 Fig. 5의 점 P는 CELL(3,8)이라는 곳에 그 정보가 담기게 된다. 접촉 기준 좌표계가 접촉 기준을 바디에 부착된 좌표계이기 때문에 바디가 공간에서 위치 및 자세가 변한다 할지라도 접촉 감지

좌표계위에서 정의된 거리 지수는 변하지 않고 항상 일정한 값을 가진다. 이것은 수치해석 전에 거리지수와 메모리를 한번만 정의하면 시간 영역에서 계속 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 접촉 기준 바디 자신의 접촉 형상에 대한 계산은 시간영역에서 불필요하게 된다.

Fig. 6은 접촉 대상인 i 바디 위의 점 q 에 대한 거리 지수 활용에 대한 설명을 나타내고 있다. 먼저 접촉 기준 좌표계에서부터 점 q 까지의 거리 벡터는 아래의 식을 이용해서 계산할 수 있다.

$$d_{cq} = r_i + s_q - r_c \quad (11)$$

여기서 r_i 와 r_c 는 각각 i 바디의 위치벡터와 접촉 기준 좌표계의 위치벡터이다. s_q 는 i 바디 기준 좌표계에서부터 점 q 까지의 거리벡터이다. 식(11)을 아래와 같이 접촉 기준 좌표계에서 바라본 벡터로 변환할 수 있다.

$$d'_{cq} = A_c^T d_{cq} \quad (12)$$

여기서 A_c 는 접촉 기준 좌표계의 자세를 의미한다.

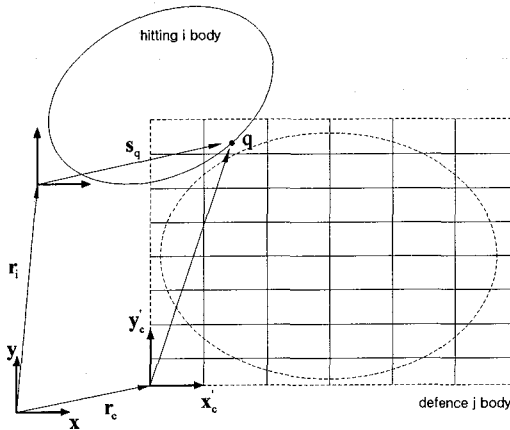


Fig. 6 Distance index of contact body

식(12)의 상대 거리 벡터인 d'_{cq} 가 구해지면 식 (10)에 대입해서 점 q 의 거리지수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_k = \text{INT} \left(\frac{d'_{cq,k}}{u_k} \right) + 1, (k = 1, 2) \quad (13)$$

식 (13)의 결과인 I_x 와 I_y 를 미리 계산해 둔 메모리 CELL에 대입하면 접촉 가능한 j 바디위의 점들의 정보를 알 수 있다.

5. 수치예제

5.1 효율성 검증을 위한 수치예제

이 절에서는 제안된 방법을 이용하여 접촉문제를 해석한 경우와 감지기술을 사용하지 않고 접촉문제를 풀었을 경우에 대해 해석시간을 비교해 보았다. Fig. 7은 20개의 구가 20개의 삼각형 패치를 가지는 지면에 접촉하는 문제에 대해서 동역학 해석을 하였다. 총 해석 시간은 5초이며, 구와 구사이의 접촉은

고려하지 않았다. 해석에 사용된 컴퓨터는 AMD사의 Opteron 2.2GHz이다. 이때 접촉 감지 기법을 전혀 사용하지 않은 것과 제안한 방법을 사용한 경우의 해석시간을 Table 1에서 비교하였다. 해석 시간은 같은 PC에서 약 6배의 속도 차이가 있었으며, 그 해석결과는 차이가 없었다.

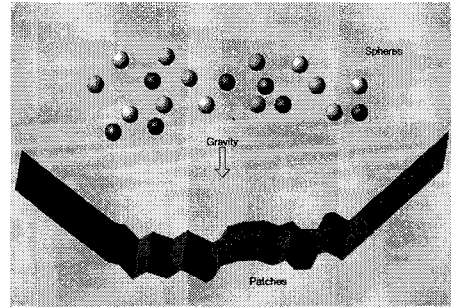


Fig. 7 Analysis model

Table 1 Comparison of analysis time

Method	Proposed	Full search
Simulation time	33 sec	195 sec

Fig. 8은 두 방법의 시간 영역에서의 결과를 나타낸다. 여기서 X축은 시간, Y축은 어떤 임의의 구에 대한 수직 방향의 위치를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

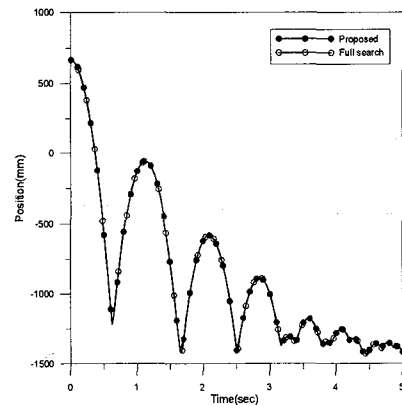


Fig. 8 Vertical response of sphere

5.2 Riser analysis

이상에서 개발된 효율적인 접촉 감지 알고리즘을 수중세장체 동적거동 해석프로그램에 포함시켰다. 세장체와 지면간의 접촉 거동을 해석하기 위하여 수치해석을 행하였다. 수치해석 모델은 Fig. 9에 나타나 있다. 단면 데이터와 각 세그먼트의 길이는 Table 2에 나타나 있다. 아크형 형상을 만들기 위해 31개의 부력모듈을 세그먼트 BC에 붙였다. 세그먼트 AB, BC, CD의 길이는 각각 360m, 91m, 200m이다. Table 3에는 조류, 밀도 등 환경 조건이 나타나 있다.

부력모듈이 장착된 부분은 직경이 0.4286m인 등가의 원형단면 빔으로 모델링하였으며, 단위길이당 같은 항력이 발생하는 것을 기준으로 직경을 선택하였다. 변형된 단면에 의해, 유효하중은 -435.57N/m , 단위길이당 질량은 176.67kg/m , 굽힘강성은 9.542kNm^2 으로 계산되었다.

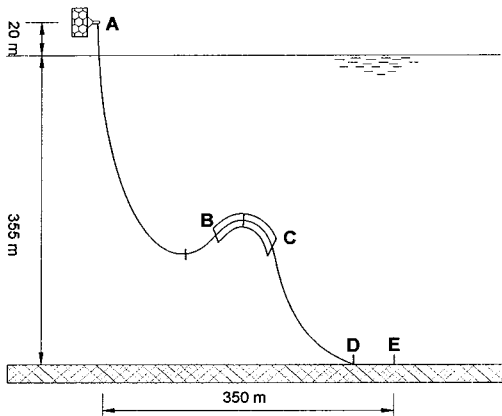


Fig. 9 Geometry of Lazy-wave

Table 2 Cross-section data

Flexible riser without buoyancy element	
Axial stiffness(EA)	10000 kN
Bending stiffness(EI ₂₂ , EI ₃₃)	6.57 kNm ²
Torsional stiffness(GI ₁₁)	1000 kNm ² /rad
External diameter	0.2154 m
Effective weight	506.67 N/m
Mass including content	89 kg/m
Flexible riser with buoyancy module	
Axial stiffness(EA)	10000 kN
Bending stiffness(EI)	100 kNm ²
Torsional stiffness(GI ₁₁)	1000 kNm ² /rad
External diameter	0.855 m
Effective weight	-2320.06 N/m
Mass including content	352 kg/m
Hydrodynamic coefficient(both sections)	
Inertia force coefficient(CM)	2.0
Drag coefficient(CD)	1.0
Tangential drag coefficient(CF)	0.05

Table 3 Environmental conditions

Density of sea water	1025 kg/m ³
Bottom friction coefficient	0.75
Current profile(linear interpolation)	
Surface	1.0 m/s
Mid-waterdepth	1.0 m/s
Bottom	0.0 m/s

Fig. 10은 수중세장체가 시간변화에 따라 지면에 안착하는 결과를 나타내고 있다. 세장체가 지면에 안착할 경우에 수치해석 시간이 많이 소요되었으나, 지면에 안착한 후에는 빠른 속도로 수치해석이 진행되었다. 1300초부터 세장체가 지면에 닿기 시

작했다. Fig. 11은 시간에 따른 노드(65, 66, 67)의 장력변화를 나타내고 있다. 지면에 접촉하기 전까지 장력이 증가하다 지면에 접촉한 이후에는 장력이 줄어드는 것을 알 수 있다.

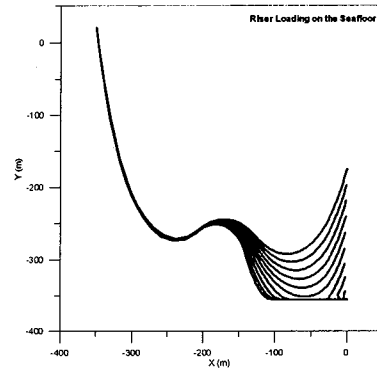


Fig. 10 Landing procedure of riser

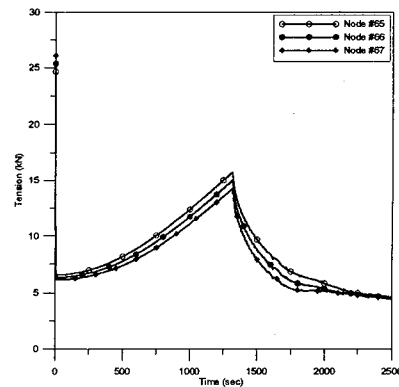


Fig. 11 Effective tension response

6. 결론

수중세장체의 접촉문제를 효율적으로 풀기위해 접촉 감지 기법 알고리즘을 개발하였다. 시스템 경계상자 개념을 제안하였고, 그것을 다시 작은 셀로 분할하여 접촉감지 기법에 활용하였다. 제안된 방법의 효율성을 검증하기 위해 접촉 감지 기법을 사용하지 않는 방법과 비교 검증하였다. 이 결과 전체 감지 기법과 비교하여 수치해석 속도가 많이 향상됨을 알 수 있었다. 아울러 개발된 접촉 감지 알고리즘을 이용하여 수중세장체 해석 프로그램에 접촉거동 해석 모듈을 첨가하였다. 이를 통한 수치해석을 행하였다. 지면과의 접촉이 원활하게 이루어지는 것을 확인하였으며, 향후 보다 정확한 수치결과를 얻기 위해 수치해석의 검증작업이 필요로 한다.

후 기

본 논문은 "기상 재난파에 의한 해양 구조물의 안정성 평가기술 개발", 해양수산특정 연구과제인 "심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발" 및 "CO₂ 해양처리기술개발(2)-CO₂ 심해주입기술

연구” 과제의 일부분으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 배대성 (1994), 오일러 매개변수의 연속적인 교정방법, 한양대학교 생산공학논문집 Vol. 3, No. 1, pp. 65-73.
- [2] Bernitsas, M. M. (1982), “Three Dimensional Nonlinear Large-Deflection Model for Dynamic Behaviour of Risers, Pipelines and Cables”, *Journal of Ship Research*, 26(1), pp. 59-64.
- [3] Chai, Y. T. , Varyani, K. S. and Barltrop, N. D. P. (2002): “Threedimensional Lump-Mass formulation of a catenary riser with bending, torsion and irregular seabed interaction effect”, *Ocean Engineering*, Vol. 29, pp. 1503-1525.
- [4] Goldstein, H. (1980), "Classical Mechanics, 2nd edition Chapter 2 The Kinematics of Rigid Body Motion", Addison-Wesley, pp. 128-187.
- [5] Haug, E. J. (1989), "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Volume I: Basic Methods", Allyn and Bacon pp. 335-347.
- [6] Hong, S. (1992), “Three dimensional nonlinear static and dynamic analysis of flexible risers” (in German), doctoral dissertation, Univ. of Aachen.
- [7] Hong, S. and Hong, S. Y. (1997), “Effects of Mooring Line Dynamics on Position Keeping of a Floating Production System”, *Proc. 7th ISOPE Conference*, Honolulu, May 25-30.
- [8] Hong, S., Kim, H. W. and Choi, J. S. (2003), "A New Method Using Euler Parameters for 3D Nonlinear Analysis of Marine Risers/Pipelines", *Proceedings of The Fifth (2003) Ocean Mining Symposium*, Japan, September 15-19, pp. 83-90.
- [9] Johnson, K. L. (1985), "Contact Mechanics", Cambridge University Press, 1985.
- [10] Lankarani, H. M. (1992), "Canonical Impulse- Momentum Equations for Impact Analysis of Multibody System", *ASME, "Journal of Mechanical Design"*, Vol.180, pp.180-186.
- [11] Lozano-Perez, T. (1983), "Spatial Planning : A Configuration Space Approach", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-32, IEEE Press.
- [12] Nikravesh, P. E. (1994), "Continuous Contact Force Models for Impace Analysis in Multibody Systems", *Journal of Nonlinear Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 5, pp.193-207.
- [13] Patrikalakis, N. M. (1986), “Three Dimensional Compliant Riser Analysis”, *5th Int. Symp. Offshore Mechanics and Archtic Eng. (OMAE)*.