

모함에 연결된 탄성 호스의 거동§

김건우* · 이재욱* · 김형렬** · 유완석*† · 안득만*

* 부산대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소

Behavior of Flexible Hose Connected to Mother Ship

Kun Woo Kim*, Jae Wook Lee*, Hyung Ryul Kim**, Wan Suk Yoo*† and Deuk Man An*

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** Agency for Defense Development

(Received June 15, 2010 ; Revised January 7, 2011 ; Accepted January 10, 2011)

Key Words : Flexible Hose(탄성 호스), Absolute Nodal Coordinate (절대 절점 좌표), Continuum Mechanics(연속체 역학), Mother Ship(모함)

초록: 모함에 연결되어 통신 케이블의 가이드 역할을 하는 탄성 호스는 모함의 운동 조건을 결정하는 중요한 인자이다. 길이가 수 십 미터에 달하는 탄성 호스를 실제 상황에서 실험을 하기에는 어려움이 있으므로 해석을 통해 거동 특성을 분석하고자 한다. 탄성 호스는 곡률 반경에 대한 변형뿐만 아니라 축 방향에 대한 변형도 발생하므로, 축 방향에 대한 변형 구배가 좌표계에서 유도되는 절대 절점 좌표계로 모델링하였으며, 연속체 역학 개념을 도입함으로써 대변형 효과를 표현하도록 하였다. 탄성 호스의 끝 단에 연결된 모함은 강체 모델로 표현하였고, 조향각에 의해 운동이 결정되도록 하였다. 또한, 수중에서 호스가 거동할 때 발생하는 유체 저항력을 고려함으로써 수중에서의 탄성 호스 거동 특성을 분석하였다.

Abstract: A flexible hose attached to a mother ship experiences various motions that depend on the movement of the mother ship and that of underwater vehicle. Although the motion of the hose is a very important factor that determines how a mother ship should be steered in a real situation, it is difficult to experimentally obtain information about the hose motion. Therefore, we study the motion of the hose analytically. The ANCF(absolute nodal coordinate formulation) was used to model the hose, because this formulation can relax the Euler-Bernoulli theory and the Timoshenko beam theory and allow the deformation of the cross section. The mother ship is assumed to be a rigid body with 6 degrees of freedom. The motion of the hose is predominantly affected by the behavior of the mother ship and by the fluid flow.

1. 서 론

모함(mother ship)에 장착된 탄성 호스는 수중 운동체 사이의 통신을 하기 위한 통신 케이블을 보호하는 역할을 한다. 통신 케이블의 경우 매우 작은 직경으로 인해 수중에서 거동 시 불안정 요소가 되므로 간섭에 의해 치명적 손상이 가해질 수 있다. 이러한 손상을 방지하기 위해 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 통신 케이블을 탄성 호스로 감싸야만 한다.^(1,2)

모함에 연결된 탄성 호스는 그 길이가 수 십

미터 이므로, 실제 수중에서 실험을 통해 거동을 분석하는 것이 현실적으로 어렵다.



Fig. 1 The system of mother ship

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주과기원) 발표논문임.

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

그러므로 근사적 모델링을 통한 해석으로부터 거동 특성을 분석하고, 호스의 변형 정도를 분석함으로써 모함 및 수중 운동체의 운전 조건을 결정하는 것이 중요하다.

탄성 호스가 수중에서 거동을 할 때, 곡률 반경(radius of curvature) 뿐만 아니라 축 방향에 대한 토션(torsion)도 중요한 요소가 된다. 단면의 급격한 변화는 통신 케이블의 압착 효과를 일으킬 수 있으므로 적절한 강성을 가진 재료를 선정해야만 한다. 곡률 반경 및 축 방향에 대한 대변형(large deformation) 현상을 고려하기 위해, 1990 년대를 전후하여 개발된 절대 절점 좌표계(Absolute Nodal Coordinate Formulation)를 사용하였다. 이때, 변형률(strain)을 연속체 역학(continuum mechanics)의 2 차 항까지 표현함으로써 대변형 현상을 정확히 나타낼 수 있도록 하였다.⁽³⁻⁷⁾

탄성 호스의 거동은 모함의 운동에 의해 직접적으로 영향을 받게 되는데, 탄성 호스의 끝단에 부착되어 탄성 호스의 거동을 결정하는 모함은 2 차원 강체(rigid body) 모델로 구성하였다.⁽⁸⁻⁹⁾ 모함의 운동 방정식에서 힘 및 모멘트를 결정하는 다양한 계수들은 해석적인 방법과 실험적인 방법으로부터 구할 수 있는데, 모함마다 고유의 계수 값들을 가지므로 실험 및 해석 조건에 맞는 모함을 선정해야만 한다.⁽¹⁰⁾

2. 운동 방정식

2.1 절대 절점 좌표계

대변형 현상을 표현할 수 있는 절대 절점 좌표계는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 하나의 노드(node)에서 위치 벡터와 기울기 벡터로 표현되므로 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$\vec{e}_j = \begin{bmatrix} \vec{r}^T \\ \vec{r}_x^T \end{bmatrix} \quad (j=A,B) \quad (1)$$

여기서, \vec{r} 는 전역 좌표계(global coordinate system)에서 정의된 벡터를 의미하며, \vec{e} 는 절점 좌표계에 의해 정의된 위치 벡터를 의미한다. 또한 기울기 벡터, 즉 \vec{r}_x 를 정의하는 것은 축 방향으로의 변형을 고려하기 위함이다.

탄성 호스의 변위는 요소 내에서의 변형 효과를 고려 하기 위한 형상함수(shape function)와 식 (1)에 의해, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{r}(x,t) = S(x)\vec{e}(t) \quad (2)$$

에너지 방정식과 가상일(virtual work)의 원리 및

식 (2)를 적용하면, 질량 행렬(mass matrix)와 강성 행렬(stiffness matrix) 그리고 외력(external force) 벡터를 절점 좌표계에 대해서 나타낼 수 있다. 다음 식 (3)~(5)는 운동에너지(kinematic energy) 그리고 가상일의 원리를 나타낸다.

$$T = \int_V \rho \vec{r}^T \dot{\vec{r}} dV = \dot{\vec{r}}^T \int_V \rho S^T S dV \dot{\vec{r}} \quad (3)$$

$$\delta W_s = - \int_V \sigma_{P2} : \delta \epsilon dV \quad (4)$$

$$\delta W_e = \int_V \vec{F}^T \delta \vec{r} dV = \int_V \vec{F}^T S \delta \vec{e} dV \quad (5)$$

여기서, σ_{P2} 는 the second Piolar-Kirchhoff stress tensor 이고, ϵ 은 the Green-Largangian strain tensor 이며, \vec{F} 는 외력을 의미한다.

이로부터 탄성 호스의 운동 방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M \ddot{\vec{e}} + K(\vec{e}) \vec{e} = \vec{F}_e \quad (6)$$

2.2 모함의 운동방정식

탄성 호스 끝 단에 연결되어 탄성 호스의 거동을 결정하는 모함은 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 지역 좌표계(local coordinate system)에서 정의 되었고, 2 차원 강체 모델로 구성하였다. Table 1 에는 모함의 자유도 및 각 자유도에 대한 좌표를 구성하는 기호에 대해 나타내었다. Table 1 을 바탕으로 식 (7)에는 모함의 운동방정식을 나타내었다.^(8,9)

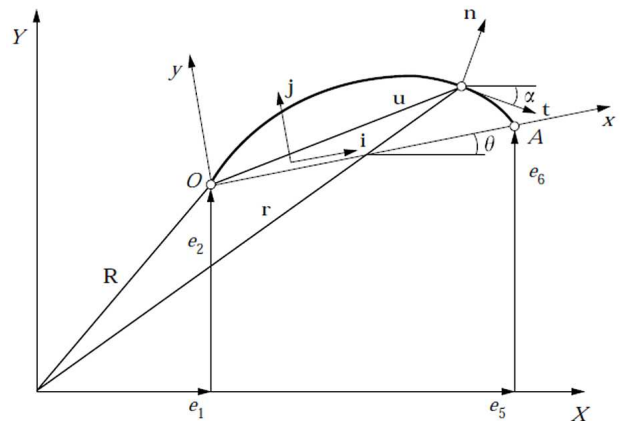


Fig. 2 Position and slope coordinates in ANCF

Table 1 Components for a tanker.

DOF	Forces & Moments	Body-Fixed Velocities	Position & Euler Angles
1(surge)	gX	u	x
2(sway)	gY	v	y
3(yaw)	gL_N	r	ψ

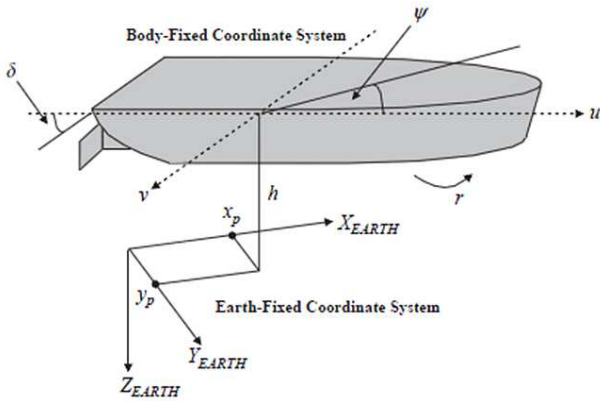


Fig. 3 The ESSO 190,000-dwt tanker

$$\begin{aligned} \dot{u} - vr &= gX \\ \dot{v} + ur &= gY \\ (Lk_z)^2 \dot{r} + Lx_c ar &= gL_N \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 L 은 모함의 길이를 의미하며 k_z 는 요(yaw)에 대한 모함의 선회 반경을 나타낸다.^(9,10)

모함의 운동방정식은 지역 좌표계에서 정의를 하는 것이 타당한데, 이는 모함의 자세가 변하더라도 질량 중심(center of gravity) 및 관성 모멘트(moment of inertia)가 변하지 않으므로 운동방정식을 계산하는데 효율적이기 때문이다. 모함의 운동 방정식을 보면, 부가 질량(added mass)항, 댐핑(damping), 복원력(restoring forces) 등 다양한 요소들이 포함되어 있음을 알 수 있다.^(9,10)

2.3 좌표 변환

모함은 절대 절점 좌표계와 자유도가 다르기 때문에 좌표계를 동일하게 해 주어야만 한다. 즉, Fig. 4 에서 보는 바와 같이 강체 모델은 하나의 절점에 대해 3 개의 자유도를 가지지만 절대 절점 좌표계는 각 노드에서 6 개의 좌표를 가지므로 절점 좌표계로 변환해 주어야만 한다. 이 때, 변환 공식은 식 (8)과 같다.^(11,12)

$$\vec{r} = S\vec{e} = \vec{R} + AS_i\vec{q}_f \quad (8)$$

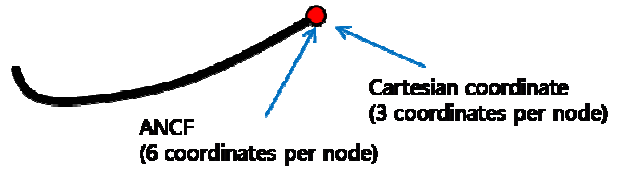


Fig. 4 Degree of freedom for each coordinate system

여기서, \vec{R} 는 전역 좌표계에서 정의된 위치 벡터를 의미하고 A 는 지역 좌표계에서 정의된 벡터를 전역 좌표계로 변환을 해주는 행렬이다. 또한 S_i 은 지역 형상 함수(local shape function)이며, \vec{q}_f 는 지역 좌표계에서 정의된 벡터로써 시간에 의존하는 변형 좌표이다. 또한 \vec{q}_f 는 변형체(flexible body)일 경우는 시간에 의존하므로 속도 및 가속도 값을 가지지만 강체인 경우는 상수로 정의된다.^(11,12) 이 식은 모두 절점에서 정의되었고, 절점의 조인트(joint)에서의 변형이 없다고 가정할 수 있다.

만약 탄성 호스가 노드점에서 기울기가 고정되어 있지 않고, 병진 자유도만 구속되어 있다면 절대 절점 좌표계에서의 기울기는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r_1}{\partial x_i} &= \frac{\partial \rho_1}{\partial x_i} A_{11} + \frac{\partial \rho_2}{\partial x_i} A_{12} \\ \frac{\partial r_2}{\partial x_i} &= \frac{\partial \rho_1}{\partial x_i} A_{21} + \frac{\partial \rho_2}{\partial x_i} A_{22} \end{aligned} \right\}_{i=1,2} \quad (9)$$

여기서, $\vec{\rho} = S_i\vec{q}_f$ 를 나타낸다.

2.4 유체 저항력

흐르지 않는 유체를 가정하면 식 (10)과 같이 유체 저항력은 호스의 거동에 의한 속도에 의해 발생하는 것과 같이 고려할 수 있다.

$$\vec{F}_a = -\frac{1}{2} C_D \rho_w d |\vec{v}_n| \vec{v}_n \quad (10)$$

여기서 C_D 는 레이놀즈 수(Reynolds number)에 의해 결정되는 저항 계수이고, ρ_w 는 유체 밀도, d 는 호스의 지름을 나타낸다. 그리고 \vec{v}_n 는 전역 좌표계에서 결정되는 탄성 호스에 수직으로 작용하는 속도로 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 식 (11) 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{v}_n = \vec{v} - (\vec{v} \cdot \vec{a})\vec{a} = \vec{a} \times (\vec{v} \times \vec{a}) \quad (11)$$

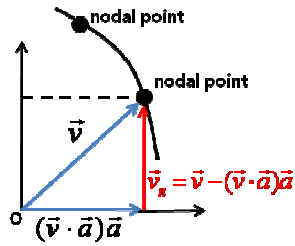


Fig. 5 Representation of the normal velocity vector

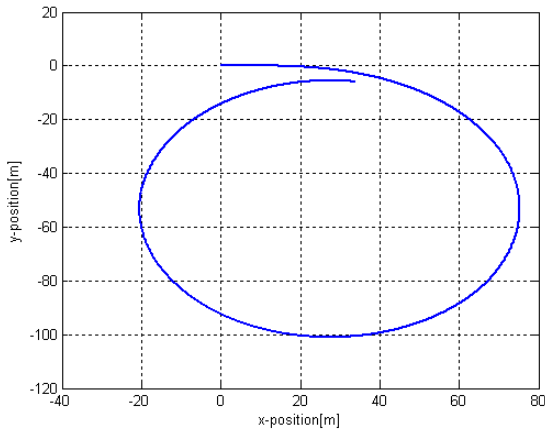


Fig. 6 The behavior of mother ship with 10 degree rudder angle

3. 모함 및 호스의 거동

3.1 조향 및 추진에 의한 모함의 거동

모함은 지역 좌표계에서 정의되었으므로 지역 좌표계에서 접선 방향의 속도와 조향각(rudder angle)이 모함의 거동에 지배적인 역할을 한다. Fig. 6 은 x-y 평면에 대한 모함의 위치를 나타내는 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 모함은 조향각 및 지역 좌표계에서의 속도를 정해주면 모함의 거동을 나타낼 수 있다. 또한 모함은 처음 약 15m 지점까지는 추진력(propulsion)에 의해 직선 운동을 하다가 회전각이 평형을 이루게 되면 회전 운동을 시작하게 된다. 그 이후로는 반경이 약 45m 에 달하는 원 운동을 한다.

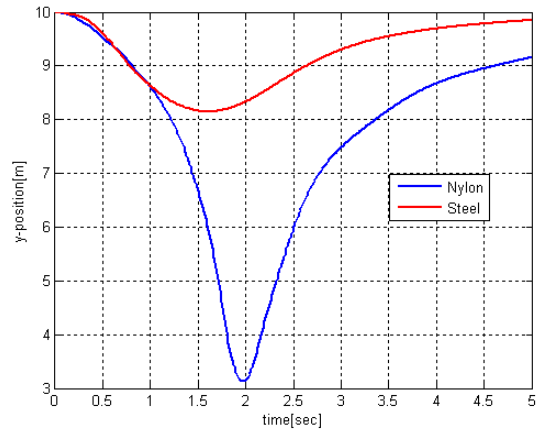
3.2 수중에서의 탄성 호스 거동

탄성 호스는 길이가 10m 이고 0.02(b)x0.02(h) [m²]의 정사각형 단면을 가지는, 탄성 호스의 재료 중 탄성 계수가 낮은 나일론(nylon)과 탄성 계수가 높은 강철(steel)을 고려하였고, 그에 대한 탄성계수(Young's modulus), 푸아송 비(Poisson's ratio) 및 밀도(density)를 Table 2 에 나타내었다.

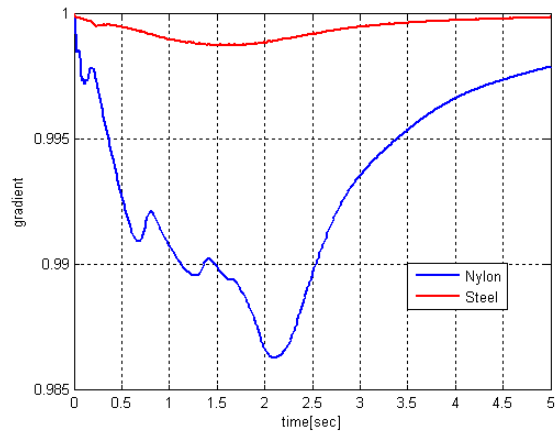
탄성 호스는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 수직 방향의 속도에 의해 저항을 받게 된다. Fig. 7 에서

Table 2 The properties of nylon and steel

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m ³]
Nylon	2.1	0.4	1100.0
Steel	210.0	0.3	7850.0



(a)



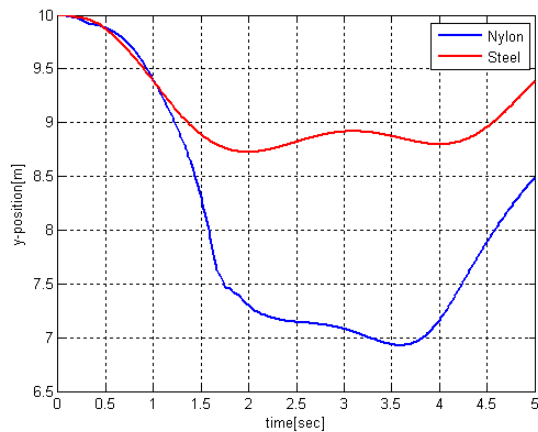
(b)

Fig. 7 The results at 3.66m/s constant velocity: (a) the y-position of the end node; (b) the gradient of the cross section area

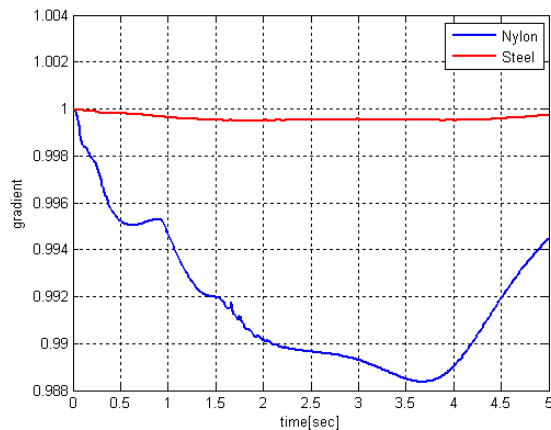
는 초기 상태의 탄성 호스가 수직(y 축 방향)으로 나열되었을 때, x 축 방향으로 3.66m/s 의 일정 속도로 진행할 때의 결과이다. 이 그래프에는 시간에 따른 호스 끝 단의 x-y 평면에 대한 위치 및 두 번째 절점의 단면 변형 정도를 나타내는 단면에 대한 구배를 나타내었다. 그리고 Fig. 8 에는 초기 속도가 2m/s 이고 최대 2.5m/s 및 최저 속도가 1.5m/s 의 사인 함수 형태로 속도가 변화하는 모함을 고려한 결과를 나타내었다.

Table 3 The two kinds of driving condition

	Velocity[m/s]
Case I	$\dot{u} = 3.66$
Case II	$\dot{u} = 2 + 0.5 \times \sin(0.02t)$



(a)



(b)

Fig. 8 The results of time varying velocity: (a) the y-position of the end node; (b) the gradient of the cross section area

모함에 대한 두 가지 운전 조건이 Table 3 에 나타나 있다.

먼저 호스가 모함의 가장 밑 부분에 부착되어 있다고 고려하자. 이 경우 Fig. 7(a) 에서 보는 바와 같이 두 가지 재료 모두 호스 끝 단이 모함의 아래 부분에 닿지 않으므로 호스가 안정적으로 거동함을 알 수 있다. 이 때, 단면에서의 구배가 나일론에서는 최대 약 1.3% 정도 나타나지만 강철은 최대 약 0.02% 정도로

거의 나타나지 않는다. 이는 탄성 계수가 작고 푸아송 비가 크기 때문에 나타나는 현상으로써, 나일론의 경우 단면이 단면 중심으로 압착될 경우 통신 케이블에 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

Fig. 8 은 속도가 주기 $0.01/\pi$ 로 변하는 사인파 함수에 대한 결과를 나타내었다. 모함이 가속과 감속을 하는 경우에도 호스 끝 단이 모함의 아래 부분에 닿지 않으므로 호스의 거동이 안정적임을 알 수 있다. 그리고 단면에서의 구배를 보면 나일론이 약 1.2% 정도를 보이는데, 이 경우에도 호스의 압착이 통신 케이블에 영향을 줄 수 있다.

4. 결론

통신 케이블의 가이드(guide)역할을 하는 탄성 호스는 모함의 운동에 의해 거동이 결정되며, 이로 인해 모함의 운동을 결정하는 데 중요한 역할을 한다.

이 논문에서는 2 차원에서 운동하는 모함을 고려하였고, 탄성호스는 모함의 바닥에 연결되어 모함의 운동에 의해 거동이 결정된다고 가정하였다. 탄성 호스는 곡률 및 토션에 대한 대변위 및 대변형 현상을 고려하기 위해 절대 절점 좌표계로 부터 운동 방정식을 구성하였다. 탄성 호스가 수중에서 움직일 때, 유체 저항은 탄성 호스의 수직 방향의 속도에 의해 결정되도록 하였다.

모함의 운전 조건은 3.66m/s 의 일정 속도로 움직이는 경우와 최대 2.5m/s 및 최저 속도가 1.5m/s 로 감속 및 가속이 가능한, 주기가 $0.01/\pi$ 인 경우를 고려하였다. 호스의 끝 단이 x 축 넘지 않으므로, 즉 모함의 바닥에 부딪히지 않으므로 탄성 호스는 안정적으로 거동함을 알 수 있었다. 그리고 단면에서의 구배는 탄성 계수가 작고 푸아송 비가 큰 나일론의 경우가 더 크게 나타났는데, 탄성 호스의 설계 시 호스 단면의 압착 정도를 고려하여 설계 하여야 한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 관련기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Hover, F. S., Grosenbaugh, M. A. and Triantafyllou, M. S., 1994, "Calculation of Dynamic Motions and Tensions in Towed Underwater Cables," *IEEE Journal of Ocean Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 449-457.

- (2) Jordan, M. A. and Bustamante, J. L., 2008, "Guidance of Underwater Vehicles with Cable Tug Perturbations under Fixed and Adaptive Control System," *IEEE Journal of Ocean Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 579~598.
- (3) Omar, M. A. and Shabana, A. A., 2001, Application of the Absolute Nodal Co-ordinate Formulation to Multibody System Dynamics, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 214, No. 5, pp. 833~851.
- (4) Shabana, A. A., 2008, Computational Continuum Mechanics, *Cambridge University Press*.
- (5) Berzeri, M. and Shabana, A. A., 2000, "Development of Simple Models for the Elastic Forces in the Absolute Nodal Co-ordinate Formulation," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 235, No. 4, pp. 539~565.
- (6) Shabana, A. A. and Yakoub, R. Y., 2001, "Three Dimensional Absolute Nodal Coordinate Formulation for Beam Elements: Theory," *Transactions of the ASME*, Vol.123, pp. 606~613.
- (7) Yakoub, R. Y. and Shabana, A. A., 2001, "Three Dimensional Absolute Nodal Coordinate Formulation for Beam Elements: Implementation and Applications," *Transactions of the ASME*, Vol. 123, pp. 614~621.
- (8) Van Berlekom, W. B. and Goddard, T. A., 1972, Maneuvering of Large Tankers, *Transactions of SNAME*, Vol. 80, pp. 264~298.
- (9) Fossen, T. I., 1994, "Guidance and Control of Ocean Vehicles," *John Wiley & Sons Ltd*.
- (10) Rhee, K. P., Yoon, H. K., Sung, Y. J., Kim, S. H. and Kang, J. N., 2000, "An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Submerged Body Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device," *International Workshop on Ship Maneuverability*, pp. 1~20.
- (11) Shabana, A. A. and Schwertassek, R., 1997, "Equivalence of the Floating Frame of Reference Approach and Finite Element Formulations," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 33, No. 3, pp. 417~432.
- (12) Berzeri, M., Campanelli, M. and Shabana, A.A., 2001, "Definition of the Elastic Forces in the Finite-Element Absolute Nodal Coordinate Formulation and the Floating Frame of Reference Formulation," *Multibody System Dynamics*, Vol. 5, pp. 21~54.