

유체 · 구조물 상호 작용 기법을 이용한 오일 펜스의 변형 예측

김 태 균^{*1}, 김 옥^{*2}, 허 남 건^{*3}

Prediction of Deformation of an Oil-fence by using Fluid · Structure Interaction Method

T. G. Kim, W. Kim and N. Hur

In the present study a method of computing fluid-structure interaction is presented to simulate the deformation shape of an oil fence which is used to contain or to divert the split oil in sea water. The computation is performed by taking into account of the force and moment balance in each computational element of the oil fence. The forces and moments acting on each element of the structure is computed from the flow analysis, which in turn is used to predict deformed shape of the structure until the procedure converges. The flexibility of the oil fence was also considered in the analysis. It is shown from the present study that the predicted deformed shapes agree quite well with the available experiment data.

Key Words: 유체 구조물 상호 작용(Fluid Structure Interaction), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 오일 펜스(Oil Fence)

1. 서론

최근 환경 오염 문제가 대두되고 있으며, 그 중 해양 생태계의 파괴가 문제시되고 있다. 그 원인으로는 공장 오염 물질의 방출, 생활 하수 등 다양하다. 또한 해양에서의 사고, 예를 들어 화학 물질이나 기름 등을 나르는 컨테이너 선이나 유조선 등의 좌초로 인한 사고도 해양 오염을 유발하는 커다란 요인 중의 하나이다. 후자의 경우 오일 펜스를 사용하여 그 피해를 최소화시킬 수 있다. 그러나 주어진 조건에 대한 효과적인 오일 펜스의 적용을 위해서는 여러 변수들이 고려되어야 한다. 이러한 이유로 인해 오

일 펜스의 설계에 있어 많은 노력과 시간이 소요된다. 오일 펜스는 설계된 값 이상의 빠른 유속이나 압력을 받을 수 없다. 왜냐 하면 유동의 상태는 오일 펜스의 변형에 크게 관여하기 때문이다. Lee등[1]은 실험을 통하여 오일 펜스의 길이, 유동의 속도와 ballast의 무게에 따른 무차원 상수 α 를 도입하여 오일 펜스의 변형을 설명하였다. 주어진 유동에서 오일 펜스의 실제적인 견인량(draft)을 판단하기 위해서는 오일 펜스와 유동 사이의 수직 수평적 상대 속도가 조사되어야 한다. Lee와 Kang[2]은 오일 펜스의 실제적 견인량은 파동의 운동에 의해 상당히 좌우됨을 보여 주고 있다. 위에서 논의된 수직, 수평적 상대 속도는 오일 펜스의 길이 방향 변형 뿐만 아니라, 폭 방향으로도 변형을 일으키게 되며, 이러한 변형은 견인량을 감소시킨다. 게다가 끌점(towing point)이 수면 가까이 놓여진

^{*1} 학생회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

^{*2} 학생회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

^{*3} 정회원, 서강대학교 기계공학과

다면 오일 펜스는 끝점을 중심으로 변형하면서 회전할 것이며, 이는 보다 복합적인 요인으로 인해 오일 펜스의 견인력에 영향을 미친다. 이러한 현상은 유속이 빠를수록 확연히 나타나며

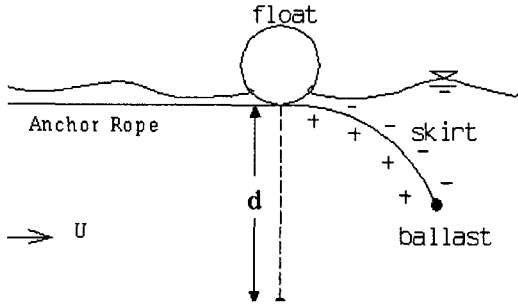


Fig. 1 Decrease of effective draft of an oil fence in current[1]

이것은 Fig. 1과 같이 유속 증가에 따라 오일 펜스는 수면과 평형을 이루는 부분이 생성되며, 이로 인해 오일 펜스가 물 속에 완전히 잠길 경우 오일 펜스가 막고 있던 물질들은 오일 펜스에서 나와 다시 흘러 넘칠 것이며 이러한 경우에 오일 펜스는 효력을 상실하게 된다. 이처럼 각각의 끝점에 대해 유동의 존재는 오일 펜스의 견인력 변화를 유발한다. 그러므로 만약 오일 펜스의 움직임이 주어진 해류 조건에 대해 적당히 예측된다면 오일 펜스의 사용이 그 상황에서 적당한지 아닌지를, 그리고 기름이 다시 흘러나가는지를 판단하는데 도움이 될 것이다. 또한 그것은 오일 펜스의 설계에 있어서 효과적인 지표를 제시 할 수 있다. 본 연구는 오일 펜스의 효과적인 설계를 위하여 유동장의 전산유체 해석 기법과 오일 펜스의 구조물 해석을 상호 연관시켜 유동장 조건에 따른 오일 펜스의 변형량을 예측하였다.

2. 수치 해석

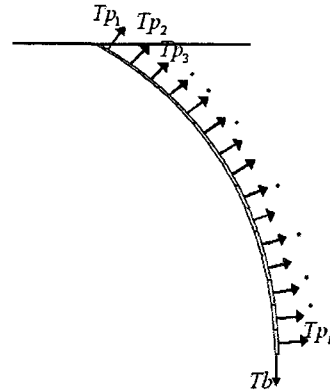
2.1 지배 방정식 및 수치 해석 방법

지배 방정식으로 정상 상태 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 식(1)은 질량 보존식을 나타내며, 식(2)는 운동량 보존 방정식을 나타낸다. 식(3)은 스칼라 보존 방정식을 나타낸다.

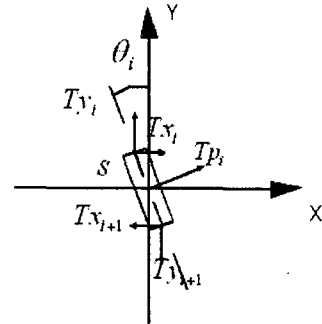
$$\text{div}(\rho \vec{v}) = s_m \tag{1}$$

$$\text{div}(\rho \vec{v} \otimes \vec{v} - \mathbf{T}) = \vec{s}_v \tag{2}$$

$$\text{div}(\rho \phi \vec{v} - \vec{q}) = s_\phi \tag{3}$$



(a) Division of an oil fence into infinitesimal elements



(b) Free body diagram of an infinitesimal element

Fig. 2 The modelling of an oil fence

위 식에서 ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도 벡터, s_m , \vec{s}_v , s_ϕ 는 각각 생성항을 나타낸다. 또한 \mathbf{T} 는 응력 텐서를 나타내며, \vec{q} 는 플럭스 벡터를 나타내며 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{T} = -\left(p + \frac{2}{3} \mu \text{div} \vec{v}\right) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{D} \tag{4}$$

$$\vec{q} = \lambda \text{grad} \phi \quad (5)$$

여기서 p 는 압력, μ 는 점성 계수, D 는 변형 텐서, λ 는 전도율이다. 유체는 물로 가정하였으며, 밀도 1000 kg/m^3 , 점성 계수 $0.001 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 을 이용하였다. 이 경우 오일 펜스의 수직 길이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 5×10^6 이며, 난류 해석을 위한 난류 모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 해석을 위한 프로그램은 본 연구실에서 개발 중인 TURBO-3D[3]를 이용하였다. TURBO-3D는 일반 좌표계를 사용하며, 유한 체적법, 집중 격자를 이용한다. 계산 알고리즘으로는 SIMPLE를 이용하며, 압력방정식은 CGM, 그 외는 SIP을 사용한다.

2.2 Oil-fence의 모델링

Fig. 2는 모델링 절차를 나타낸다. 전체 오일 펜스를 미소 요소로 나누어 각 미소 요소에 걸리는 힘을 계산한 후 이것을 이용하여 오일 펜스의 변형 위치를 알아낸다. Fig. 2의 (a)는 오일 펜스를 미소 요소로 나눈 그림이다. 여기서 T_{pn} 은 skirt에 걸리는 압력을, 그리고 T_b 는 ballast에 의해 skirt에 걸리는 장력을 나타내고 있다.

오일 펜스는 T_b 와 T_{pn} 에 의해 생성되는 모멘트에 의해 회전한다. 얻고자 하는 값은 이러한 모멘트에 의해 각 미소 요소가 갖는 회전각 θ 에 대한 양끝점의 x , y 좌표값이다. 장력과 θ 와의 관계를 유도하기 위해 Fig. 2의 (b)처럼 미소 요소의 중심에 좌표계를 잡고 길이 방향 중심선 상의 양끝점에 축방향의 가상 장력 T_{xi} , T_{yi} , T_{xi+1} , T_{yi+1} 을 놓았다. 이렇게 구해진 양끝점의 x , y 좌표값들을 이용하여 오일 펜스의 전체적인 변형 양상을 얻을 수 있다. 이것은 다음과 같은 식을 이용하여 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0: & \begin{aligned} & T_{x1} - T_{x2} + T_{p1} \cos \theta_1 = 0 \\ & T_{x2} - T_{x3} + T_{p2} \cos \theta_2 = 0 \\ & \vdots \\ & T_{xi} - T_{xi+1} + T_{pi} \cos \theta_i = 0 \end{aligned} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0: & \begin{aligned} & T_{y1} - T_{y2} + T_{p1} \sin \theta_1 = 0 \\ & T_{y2} - T_{y3} + T_{p2} \sin \theta_2 = 0 \\ & \vdots \\ & T_{yi} - T_{yi+1} + T_{pi} \sin \theta_i = 0 \end{aligned} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum M = 0: & \begin{aligned} & Tx_1 s \cos \theta_1 + Ty_1 s \sin \theta_1 = -M_1 \\ & Tx_2 s \cos \theta_2 + Ty_2 s \sin \theta_2 = -M_2 \\ & \vdots \\ & Tx_i s \cos \theta_i + Ty_i s \sin \theta_i = -M_i \end{aligned} \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식은 각각 힘의 평형식과 모멘트 방정식을 나타낸다. 윗 식(4)~(6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & & & & \\ & 1 & -1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & -1 \\ & & & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{x1} \\ T_{x2} \\ \vdots \\ T_{xn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -T_{p1} \cos \theta_1 \\ -T_{p2} \cos \theta_2 \\ \vdots \\ -T_{pn} \cos \theta_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & & & & \\ & 1 & -1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & -1 \\ & & & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{x1} \\ T_{x2} \\ \vdots \\ T_{xn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -T_{p1} \sin \theta_1 \\ -T_{p2} \sin \theta_2 \\ \vdots \\ -T_{pn} \sin \theta_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$s \cos \theta_n + \frac{B_n}{A_n} s \sin \theta_n = \frac{M_n}{A_n} \quad (9)$$

식(7), (8)은 식(9)와 같이 간단하게 나타낼 수 있으며, 식(9)를 이용하여 회전각도 θ 를 다음과 같이 구할 수 있다. 오일 펜스가 변형하여 정상 상태에 있게 되면 오일 펜스의 각 요소에서의 모멘트값이 0이 되어야 하므로 식(9)는 다음의 식 (10)과 같이 가정할 수 있다.

$$s \cos \theta_i + \frac{T_{xi} + T_{xi+1}}{T_{yi} + T_{yi+1}} s \sin \theta_i \approx 0 \quad (10)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(-\frac{T_{xn} + T_{xn+1}}{T_{yn} + T_{yn+1}} \right) \quad (11)$$

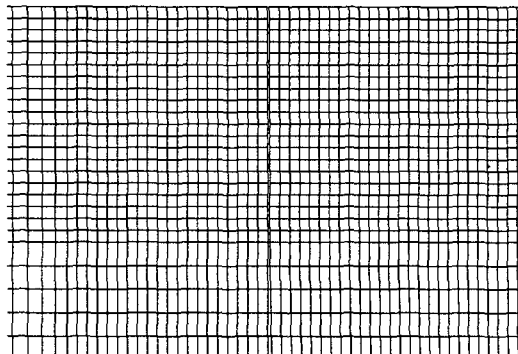
식(10)은 식(11)과 같이 변형될 수 있으며 이 식은 θ 를 구할 수 있는 최종식이며, 이 값을 이용하여 아래와 같이 미소 요소의 x, y 좌표값의 변화를 구할 수 있다.

$$x_n = x_{n-1} + l \sin \theta_n \quad (12)$$

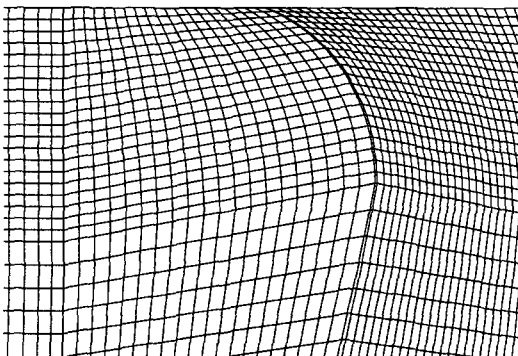
$$y_n = y_{n-1} - l \cos \theta_n \quad (13)$$

오일 펜스의 조건은 무차원 상수 α 로 나타내며 다음의 식 (14)와 같다.

$$\alpha = \frac{\rho U^2 d}{2T_b} = \frac{\text{Lateral Force}}{\text{Vertical Force}} \quad (14)$$



(a) initial undeformed mesh



(b) after deformation

Fig. 3 Computational mesh near oil fence

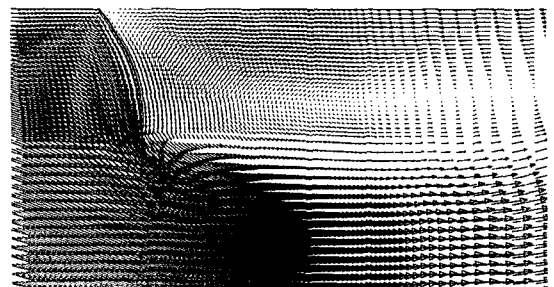
Table 1 The value of α depending on T_b

α	0.326	0.674	0.998
$T_b(\text{N/m}^2)$	38343.56	18550.99	12525.05

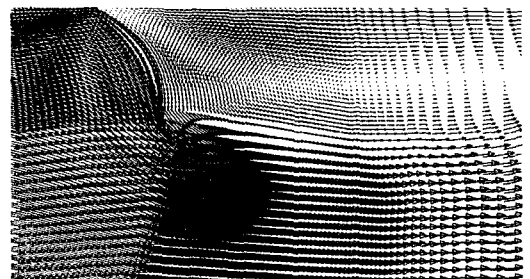
여기서 ρ 는 밀도, U 는 주유동 속도, d 는 오일 펜스의 길이를 나타내며 T_b 는 ballast에 의해 작용되는 장력이다. 위 식을 이용하여 장력 T_b 를 구할 수 있다. Table 1은 각각의 α 에 대한 T_b 값이며 표와 같이 세가지 경우에 대하여 수치 해석을 진행하였다. 수치 해석은 반복 계산을 통하여 오일 펜스의 변형이 더 이상 일어나지 않을 때를 수렴 조건으로 하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 계산 격자를 나타낸 그림이다. (a)가 초기 상태의 오일 펜스의 형상이고 (b)가 유동에 의해 변형이 된 후의 오일 펜스의 형상이다. 계산 영역 전체의 길이는 오일 펜스 길이의 45배만큼 길이에 입구와 출구를 설정하였으며, 아래쪽으로는 30배의 길이를 두어 경계 조건이



(a) $\alpha = 0.326$



(b) $\alpha = 0.674$

Fig. 4 Velocity vector plot around an oil fence

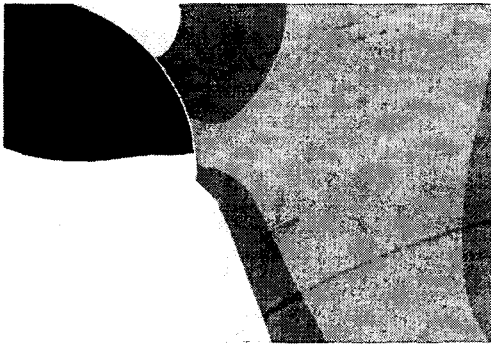


Fig. 5 Predicted pressure contour plot ($\alpha=0.998$)

오일 펜스 주위의 유동 형성에 미치는 영향을 작게 하였다. 경계 조건으로는 유동의 유입부에 입구 조건, 그 반대면에는 출구 조건, 유체가 오일 펜스와 접하는 면에서는 점착 경계조건을 주었다. 그리고 자유표면에서는 대칭경계조건을 주어 공기의 저항을 무시하고 계산하였다. 또한 오일 펜스가 무한히 긴 것으로 가정하여 2차원 계산을 수행하기 위해 3차원 방향으로 대칭경계조건을 주었다. 계산 격자는 오일 펜스를 20개로 나눈 경우 11270개, 10개로 나눈 경우

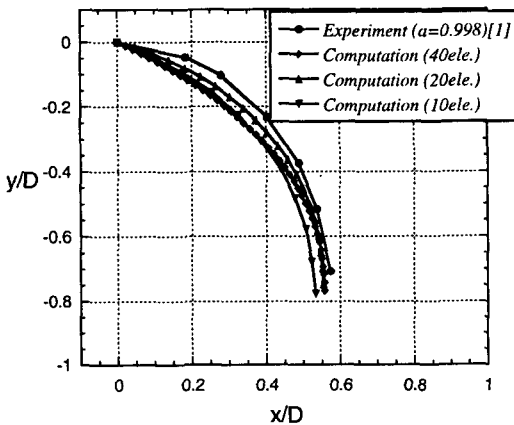


Fig. 6 Effect of mesh density on predicted deformed shape of an oil fence

11270개, 10개로 나눈 경우 6050개, 40개로 나눈 경우 총 28920개를 이용하였다. 계산은 본 연구실에서 보유 중인 Origin 2000 (4×R10K CPU, 2GB memory, 54GB HDD)을 이용하였다. 계산시간은 펜스를 20개로 나눈 경우 약 2시간 정도 소요되었다.

Fig. 4는 계산된 속도 벡터를 나타낸다. 오일

펜스 요소의 개수는 20개인 경우이다. (a), (b)는 α 값이 변화하는 경우에 대한 것이다. α 값이 커짐에 따라 오일 펜스에 횡방향의 힘이 크게 작용하므로 오일 펜스가 뒤쪽으로 처지는 것을 볼 수 있다. 오일 펜스의 뒤 부분에서 커다란 후류 영역이 형성되고 있음을 볼 수 있으며, 오일 펜스의 끝단에서 최고 속도가 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 α 가 0.998인 경우의 오일 펜스 앞 뒤면의 압력 분포이다. 펜스의 앞쪽면에 큰 압력이 걸려 오일 펜스를 밀어내고 있으며, 끝단에서 압력의 변화가 심한 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 격자의 개수가 변화함에 따른 오일 펜스의 변형량 예측에 미치는 영향에 대하여 나타낸 그래프이다. 격자 개수의 변화와 함께 오일 펜스를 나눈 미소 요소의 개수 또한 변화시켰으며, 각각 오일 펜스를 10, 20, 40으로 나누어 계산을 수행하였다. 요소의 개수가 20인 경우 대체적으로 실험값과 비슷한 경향을 가지고 있으나 요소의 개수가 40인 경우 오일 펜스의 끝단에서의 값은 실험값과 일치 하나 뒷 단에서는 약간의 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 따라서 요소의 개수에 따라 변형 형상에 약간의 차이는 있으나 대체로 요소의 개수가 많은 경우가 펜스 끝단의 위치를 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서

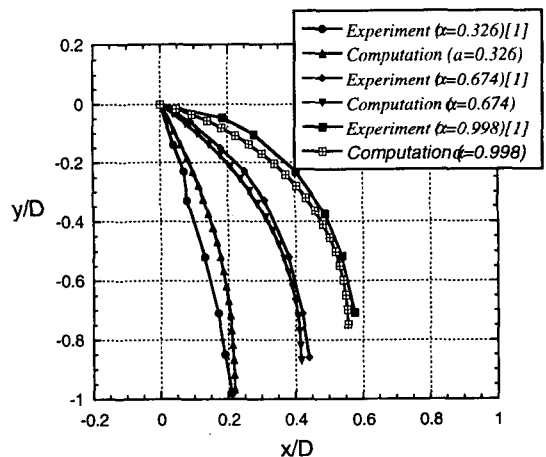


Fig. 7 Effect of dimensionless parameter α

on predicted deformed shape of an oil fence

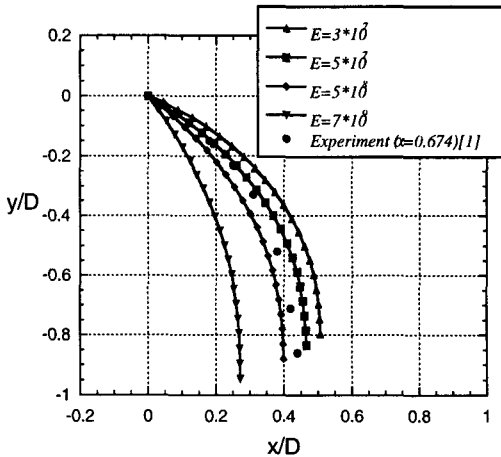


Fig. 8 Effect of stiffness of oil fence on predicted deformed shape

는 계산 시간 등을 고려하여 오일 펜스의 요소를 20개로 나눈 격자를 사용하여 여러 가지 경우에 대한 수치 해석을 진행하였다.

Fig. 7은 예측된 오일 펜스의 변형과 실험과의 비교를 나타낸 것이다. 오일 펜스를 20개로 나눈 경우에 대하여 수치 해석을 진행하였다. 밑으로 당기는 장력의 힘이 클수록 오일 펜스의 변형 양상은 잘 맞는 것을 볼 수 있다. α 가 0.326인 경우 실험값과 예측값은 오일 펜스의 양 끝단에서의 위치가 동일하게 예측되는 것을 볼 수 있으며, α 가 0.674인 경우 예측된 값이 약 2%정도의 차이로 비슷한 값을 예측하고 있음을 볼 수 있다. 실험치와 계산값과의 차이는 실험 오차일 수도 있고, 또한 본 연구에서 사용한 난류 모델등에 의한 실제 현상등과의 차이도 포함되어 있을 것이다. 또한 격자가 변형될 때 오일 펜스가 뒤쪽으로 많이 처지는 경우 오일 펜스 주변에서의 격자의 형상이 많이 찌그러지게 됨에 따라 발생하는 수치해석의 영향도 있을 것이다.

Fig. 8은 오일 펜스 재질의 강도의 차이에 대하여 변형을 예측한 결과이다. α 가 0.674인 경우이며, 각 요소의 강도 차이는 아래 식을 대입하여 차이를 나타내었다.

$$\theta = \frac{M_b L}{EI} \tag{15}$$

여기서 M_b 은 굽힘 모멘트, L 은 미소 체적의 길이, I 는 관성 모멘트, E 는 Young's modulus이다. E 의 차이로 펜스의 유연성의 차이가 나타나며, E 값이 클수록 유연성이 작은 것이다. 그림으로부터 E 값에 따라 오일 펜스의 변형이 달라짐을 볼 수 있으며, E 값이 큰 경우, 즉 펜스가 유연하지 못한 경우 펜스의 처짐이 적은 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유체 구조물 상호 작용 기법, 즉, 유동 해석 결과를 이용하여 구조물의 변형 양상을 예측하고, 변형된 구조물의 형상을 사용하여 다시 유동장을 계산하는 반복 계산을 통하여 구조물의 변형을 해석하는 방법을 사용하여, 해양에서 기름 유출 등의 사고가 있을 때 사용하는 오일 펜스의 변형을 예측하였다. 해석 결과는 발표된 실험 결과를 잘 예측하여 본 연구에서 사용한 기법이 타당함을 알 수 있었다. 또한, 오일 펜스의 해석에 사용되는 무차원 수 α 의 변화와 오일 펜스의 유연성의 변화에 따른 변형도 해석하여 타당한 결과를 얻을 수 있었으며, 본 연구의 결과는 향후 오일 펜스의 설계 및 효율적인 오일 펜스의 이용에 응용될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 포항공대 AFERC의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Lee, C.M., Kang, K.H. and Han, D.G., "On the oil fence deflection and behavior of oil water interface between tandem fences," Annual Report of Advanced Fluids Engng.

- Resurch Center, AFR-97-C01 (1997),pp. 3~35.
- [2] Lee, C. M. and Kang, K. H. "Draft loss of flexible oil fence in currents due to deformation," Annual Report of Advanced Fluids Engng. Research Center, AFR-95-FGH (1995), pp. 7~36.
- [3] 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, "일반 비직교 좌표계를 사용한 3차원 범용 유동 해석 프로그램의 개발," 대한 기계 학회 논문집, 18권(1994), pp. 3345~3356.