

파도와 조류에 의한 수직 파일의 유한요소 동적거동 해석

Finite Element Dynamic Analysis of a Vertical Pile by Wave and Tidal Current

박 문 식*

Park, Moon-Shik

(논문접수일 : 2003년 10월 17일 ; 심사종료일 : 2004년 5월 10일)

요 지

본 논문에서는 수직으로 시추된 해양 파일에 대한 새로운 동적 해석절차가 제안되고 전형적 설계문제에 의하여 검증된다. 해수에 잠긴 파일의 구조는 물론 해양파도와 조류에 의한 힘도 유한요소법에 의해서 정식화 되고 모델링된다. 유한요소 방정식에 적합한 파력을 구하기 위해서 여러 가지 파도이론 가운데서도 Airy의 파도이론이 시험되고 선정되었다. 조류의 후방와류에 기인한 횡방향 양력은 Strouhal 진동수와 적절한 양력계수를 가진 간단한 조화함수에 기초한다. 파일에 대한 고유진동수 해석과 주파수 응답해석은 정식화 결과를 NASTRAN에 입력하여 계산되었다. 여기서 제안된 절차에 의해 얻어진 동적 변위와 응력의 결과는 기본설계해석 단계로서 해양파일의 파력과 조류 양력에 의한 동적거동을 구할 수 있으며 설계에 응용될 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 수직파일, 세굴, 해양파도, 파력, 조류 와류, 유한요소, 고유진동수 해석, 응답 스펙트럼

Abstract

New dynamic analysis procedures for the vertically drilled sea water pile are suggested and demonstrated by the typical design problem. Pile structure submerged in the sea water as well as forces by the ocean waves and tidal currents are modeled and formulated by finite element method. To obtain wave forces for the finite element equation, Airy's wave theory is tested and selected among others. Lateral lifting forces induced by the vortex shedding of current flow is simply based on the harmonic function with the Strouhal frequency and lifting coefficient. Natural frequencies and frequency responses for the pile are calculated by NASTRAN using the results of the formulation. Dynamic displacement and stress results obtained by these procedures are shown to be applicable to predict the dynamic behaviors of the ocean pile by the wave and lifting forces as a preliminary design analysis.

keywords : *vertical pile, scouring, ocean wave, wave force, current vortex, finite element, natural frequency analysis, response spectrum*

1. 서 론

해양구조물의 건설과 그 시공에 있어서 흔히 쓰이는 것 중의 하나가 파일(pile)이다. 파일은 해저 지반에 시추되어 수면위에 구조물을 건조할 수 있도록 하는 기초 구조물 이므로 시공의 초기작업에 해당한다. 건설공사가 모두 끝나게 되었을 때 파일들은 해양구조물을 떠받고 있는 기둥의 역할을 한다. 이 때 파일의 설계상 관점은 해양구조물

의 일부로서 기상의 조건 즉, 바람이나 파도 또는 조류가 작용했을 때 그 기능을 잘 하는가하는 것이다. 그러나 시공공정에 있어서 파일의 관점중의 하나는 개별파일로 시추되고 난 후 개별파일로서의 파도나 조류에 의한 거동이다.

특히 기후적으로 바람과 파도가 많고 조수간만의 차가 심한 연안해안의 경우에 있어서는 공정상 개별파일 상태로 있는 기간동안의 안정성을 고려할 필요가 있다. 더욱이 지형적으로 또는 동반되는 물막이공사로 인하여 심한 조류속

* 책임저자, 정회원 · 한남대학교 공과대학 기계공학과 부교수
전화: 042-629-8278 ; Fax: 042-629-8293
E-mail: moonpark@mail.hannam.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 9월 30일까지 본 학회에 보내주 시면 2004년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

이 발생하는 경우에는 정적인 거동은 물론 동적인 거동에 주의하여야 할 것이다.

국내에서의 연구를 보면, 해양파일은 해양구조물의 시공에 쓰이는 잘 알려진 일반적인 부재임에도 불구하고 다양한 환경하중 하에서 나타나게 되는 해수의 유동현상과 구조물의 연성효과의 복잡성 등으로 인하여 동적거동에 관한 완전한 이해와 그 설계방법 등이 아직도 부족한 실정이다. 즉, 대부분의 연구들에서 파일을 강체로 가정하고 작용하는 환경하중을 구한다든지, 구해진 환경하중을 적용하여 정적응력해석을 하는 정도에 지나지 않고 있다. 국내의 연구로서는 2~3개의 파일군에 작용하는 파력을 여러 가지 파라미터에 대해서 실험적으로 구하고 회절이론과 비교하는 연구를 한 바 있으며,¹⁾ 해양 가이드타워를 모델링하면서 파력과 조류력에 의한 모리슨 식을 계산할 때 통계학적 방법에 의한 주파수해석을 통하여 구조조건성을 평가하기도 하였다.²⁾ 수심이 얕아짐에 따라 나타나는 쇄파(breaking wave)에 대해 파력에 충격력을 더하고 실험과 수치계산을 통하여 고찰하기도 하였으며,³⁾ 해저의 지지부를 고정단이 아닌 연약지반으로 놓고 동적 주파수응답 거동을 구하기도 하였다.⁴⁾ 수직파일에 대하여 풍력, 파력, 조류력의 환경하중이 작용할 때 파일의 응력해석 기법을 비교 연구하였으며,⁵⁾ 2개의 강체 원주 주변의 와류현상을 실험에 의해 구하여 회절이론과 비교하고 가시화하는 연구를 수행한 바도 있다.⁶⁾ 그러나 파력이나 조류력이 작용되었을 때 수직파일의 유동 방향 또는 횡 방향 진동 및 공진 등의 동특성에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 연안에 시추된 개별 파일의 파도와 조류에 대한 강도적인 안정성을 평가하는데 있어서 필수적인 구조적 거동을 예측하는 방법을 제안한다. 먼저 선형파도 이론을 이용하되 파도의 구분과 이론의 적용가능성을 검토하고 파도이론에 의한 가진력을 구하여 이를 파일구조물의 유한요소 운동방정식과 결합하여 동적거동에 대한 응답을 구하는 방법을 제안한다. 조류에 대하여서는 와류방출에 의한 양력을 가진력으로 모델링하고 이를 운동방정식에 적용하여 고유진동수 해석과 주파수응답 해석을 수행하여 파일구조물의 강도를 평가하는 방법을 제안한다.

본 논문의 절차를 적용하여 거동을 구하고자 하는 문제는 그림 1에서 나타낸 바와 같다. 창조시를 기준으로 수심이 $d=18.6m$ 되는 곳에 중공축 원통형 파일이 시추되었다. 파일의 수면 위로 드러난 길이는 $e=7.0m$ 이며, 해저지반의 특성상 해저표면에서 유효깊이 $c=4.0m$ 위치를 고정지반으로 생각한다. 낙조시에는 창조시보다 정수면이 $0.7m$ 낮아진다. 기상관측에 의해 바람과 파도가 관측되었으며, 특히 인근 물막이공사로 인한 증가된 조류속과 이로

인한 해저표면의 세굴현상도 관측되었는데 $4.3m$ 를 거쳐 $6.0m$ 까지 세굴되었으므로 그만큼 수심이 깊어진 영향이 있다. 바람은 NW최대 풍속기준에 파고가 $H=1.03m$, 파도의 주기는 $T=3.89sec$ 이며, 관측된 조류속은 세굴전 $1.17m/sec$, $4.3m$ 세굴 후에는 $1.9m/sec$, $6.0m$ 세굴 후에는 $2.5m/sec$ 이었다.

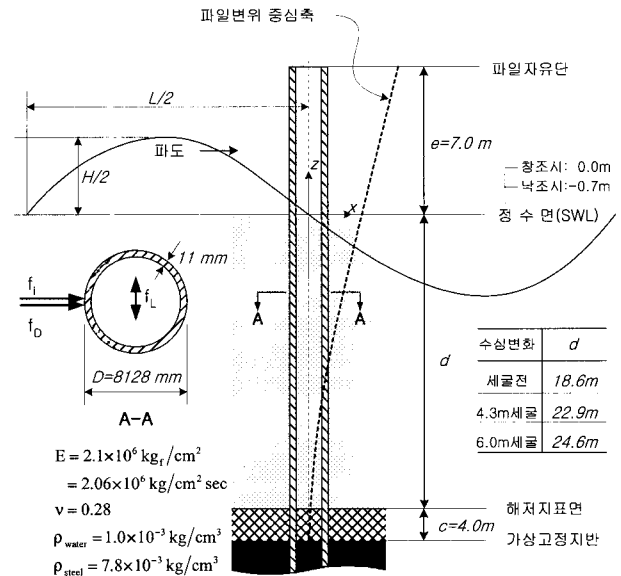


그림 1 수직으로 시추된 파일과 해양파도

2. 파일에 작용하는 파력의 계산

그림 1에서 나타낸 바와 같이 정수면(still water level, SWL)에 수직으로 해저에 설치된 파일에 파도가 칠 경우, 파도의 파장(wave length, L)에 비해 파일의 직경 D가 매우 작아 파일이 파도의 유동에 미치는 영향을 무시할 경우(즉, $D/L < 0.05$),⁷⁾ 단위길이당 파력은 다음과 같은 Morison 식으로부터 구할 수 있다.^{3),8)}

$$f = f_i + f_D = C_M \frac{\rho m D^2}{4} \ddot{u} + C_D \frac{\rho D}{2} u |u| \quad (1)$$

여기서 f_i , f_D 는 파일의 단위길이당 작용하는 관성력(inertia force)과 항력(drag force)을 의미하고 u 는 파도에 의한 유체입자의 유속이며 C_M 과 C_D 는 각각 관성계수 및 항력계수이다.

식(1)을 이용하여 파일에 미치는 파력을 구하기 위해서는 유체의 속도분포 u 및 그에 따르는 적절한 C_M , C_D 값들을 대입하여야 한다.

항력계수 C_D 의 값은 레이놀즈수와 파일의 표면거칠기에

다라 달라지며 약 0.7에서 1.5까지의 값을 갖는데 문헌에 의하면⁹⁾ 본 문제의 레놀즈수 $R_e = u_{swl}D/\nu = 7.26 \times 10^5$ 에 대하여서는 0.7을 쓰도록 제시되어 있다. 또한 관성계수는 해당 레이놀즈 수에 대하여 1.5로 제시되어 있다.

파도에 의한 유체의 속도분포는 시간과 공간의 함수로써 추계학적 모델 또는 결정론적 모델이 존재한다.⁷⁾ 또한 심해영역($d/L > 0.5$), 천해영역($d/L < 0.05$) 및 그 중간영역에 따라 그리고 해저표면의 형상과 거칠기 및 파도의 회절, 굴절, 반사등에 따라 여러 가지 파도이론이 있으나⁹⁾ 여기서는 파일의 동적 운동방정식에 적용이 용이한 Airy의 선형 파도이론에 의한 해를 적용한다.

Airy의 이론에 의한 속도분포를 파일의 중심선에 대하여 구하면 다음과 같다.

$$u(z,t) = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2)$$

여기서 t 는 시간을, T 는 파도의 주기를, L 는 파도의 파장을, z 는 정수면으로부터 수심깊이를 나타낸다. 정수면에서의 최대속도는 $u_{swl} = u(0,0) = gHT/2L$ 이 되고 $K = \frac{g}{L \cosh(2\pi d/L)}$ 라고 하면 해저지표면에서의 최대속도는 $u_{BOT} = u(-d,0) = K \cdot u_{swl}u$ 이 된다. 즉, K 는 해저지표면에서의 유속과 정수면의 유속의 비라고 할수 있다. 파도의 파장은 심해파장(L_0)으로 만들어졌다가 연안으로 접근하면서 수심에 따라 파장이 변하게 되는데, 그러한 수정과정을 문헌에⁹⁾ 제시된 도표를 이용하여 구하고 식(2)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$u(z,t) = \frac{gHT}{2L_A} K_A \cdot \cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L_A}\right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \\ = u_{swl} \cdot K_A \cdot \cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L_A}\right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (3)$$

여기서 L_A , K_A 등은 L 및 K 값들을 수심에 따라 수정한 계수들이다. 본 논문의 문제인 NW방향 최대풍속에서 파고 1.03m, 주기 3.89sec 인 파도는 $d=18.6m$ 인 경우 파장의 변화는 미미하여 L_A 는 심해파장 값 $L_0 = gT^2/2\pi = 23.6m$ 와 거의 일치하였다. 식(3)을 식(1)에 대입하여 관성력의 최대값과($t=-T/4$) 항력의 최대값의($t=0$) 분포력 및 그 적분값을 10개의 구간적분에 의해 구하여 표 1에 나타내었다. 여기서 보면 관성력 합력은 4,010N, 저항력 합력은 400N 으로서 Dean의 유선함수 고차이론에⁹⁾ 의한 별도의 파력계산서의 값 3,995N, 483N 과 비교하면 각각 +0.4%, -17%의 오차가 있으나 저항력에 비해 관성력이 월등히 큰 점을 감안하면 충분히 근사한 값을 알 수 있고 따라서 동역학적 거동 해석에 식(3)과 식(1)을 이용할 수 있다는 결론을 얻는다.

한편 식(1)은 항력의 식에 비선형항(u^2)을 가지고 있으므로 이 때문에 파일의 진동과 함께 운동방정식을 푸는데 있어서 어려움이 따른다. 그러므로 Borgman이¹⁰⁾ 제안한 평균제곱($\overline{u^2} = \sigma_u^2$)을 최소화하는 방식의 통계이론을 이용하여 다음과 같이 선형 근사화 한다.

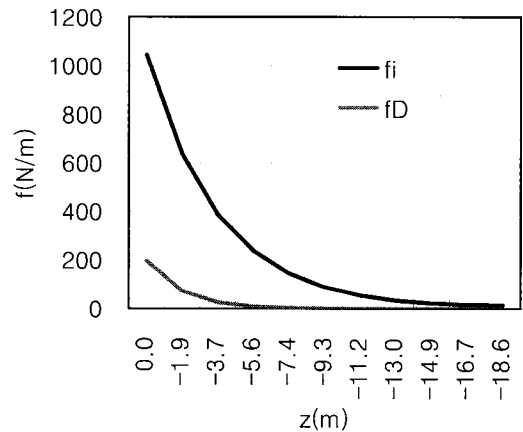
$$f = f_i + f_D \approx C_M \frac{\rho \pi D^2}{4} \dot{u} + C_D \frac{\rho D}{2} \sigma_u \sqrt{8/\pi} u \quad (4)$$

여기서 σ_u 는 파도유속의 표준편차이고 항력은 선형화 되었으므로 선형미분방정식 이론에 의한 동역학 운동방정식의 풀이가 가능하다.

표 2에 식(4)에 의해 선형화하여 계산된 항력이 $f_{D(LIN)}$ 으로 표기되었고 그 합력이 427N으로 계산되었는데 식(1)에 의한 계산 값 즉, 표 1의 f_D 와 비교하면 비선형 Morison 파력식에 의한 합력이 400N이었으므로 충분히

표 1 Airy의 파도이론에 의해 계산된 파력 값 및 그래프

NW 방향 최대풍속 (d=18.6m)					
z	f_i	f_D	ΔF_i	ΔF_D	ΔF
0	1045.72	196.85			
-1.86	637.62	73.18	1565.51	251.13	1816.63
-3.72	388.84	27.22	954.60	93.37	1047.97
-5.58	237.21	10.13	582.23	34.73	616.96
-7.44	144.87	3.78	355.34	12.93	368.27
-9.3	88.72	1.42	217.23	4.83	222.06
-11.16	54.73	0.54	133.41	1.82	135.23
-13.02	34.43	0.21	82.92	0.70	83.62
-14.88	22.72	0.09	53.15	0.28	53.43
-16.74	16.70	0.05	36.66	0.13	36.79
-18.6	14.84	0.04	29.33	0.08	29.41
(m)	(N/m)	(N/m)	(N)	(N)	(N)
Resultant Force (N) =			4010	400.0	4410



근사함을 보이고 있다. 여기서 관성력과 선형화항력의 합력계산은 앞으로 사용을 위해 유한요소법의 절점하중으로서 파일의 잠긴부분의 19개 요소에 대하여 구해진 것이다.

표 2 식 (4)에 의한 파력

NW 방향 최대 풍속 (d=18.6m)				
Z	f _{i(LIN)}	f _{D(LIN)}	{F _{i(FE)} }	{F _{D(FE)} }
0.00	1045.72	222.12	472.74	94.01
-0.98	805.99	131.95	797.99	135.14
-1.96	621.23	78.39	615.07	80.29
-2.94	478.84	46.57	474.09	47.70
-3.92	369.12	27.67	365.45	28.34
-4.89	284.57	16.45	281.74	16.85
-5.87	219.42	9.78	217.25	10.02
-6.85	169.25	5.82	167.57	5.96
-7.83	130.61	3.47	129.32	3.55
-8.81	100.89	2.07	99.89	2.12
-9.79	78.05	1.24	77.27	1.27
-10.77	60.53	0.74	59.93	0.76
-11.75	47.14	0.45	46.67	0.46
-12.73	36.96	0.28	36.59	0.28
-13.71	29.31	0.17	29.02	0.18
-14.68	23.65	0.11	23.42	0.12
-15.66	19.61	0.08	19.41	0.08
-16.64	16.90	0.06	16.73	0.06
-17.62	15.35	0.05	15.20	0.05
-18.60	14.84	0.04	7.35	0.02
(m)	(N/m)	(N/m)	(N)	(N)
Resultant Force (N) =			3953	427

3. 해양 수직 파일의 운동방정식

파일에 파도에 의한 파력이 작용하면 탄성을 가진 파일은 구조변위를 일으키게 된다. 가진력이 작용하는 파일의 진동해석을 위해서는 유한요소법을 이용하면 다음과 같이 표시된다.

$$[M]\{\ddot{Y}\} + [C]\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = \{F(t)\} \quad (5)$$

여기서 {Y}는 파일의 유한요소 절점변위이며 {F(t)}는 파일에 작용하는 이산화 가진력이고, [M], [C], [K]는 각각 파일구조물의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬이다. 만약에 파일에 변위가 발생하면 식(4)에 의한 힘은 달라지게 되는데 이는 유속과 파일운동속도의 상대속도만큼의 힘이 작용하게 된다. 만약 유속과 파일의 운동속도간의 상대속도를 $v = u - \dot{y}$ 라 하면 식(1)는 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$f = M_H(\ddot{u} - \ddot{y}) + C_H(u - \dot{y})$$

$$M_H = C_M \frac{\rho \pi D^2}{4}, \quad C_H = C_D \frac{\rho D}{2} \sigma_u \sqrt{8/\pi} \quad (6)$$

따라서 식(6)을 유한요소법을 이용하여 이산화 하는 파

동을 거치면 파도에 의한 가진력은 다음과 같이 된다.

$$\{F(t)\} = \{F_i\} + \{F_D\} = [M_H]\{(\ddot{U}) - (\ddot{Y})\} + [C_H]\{(\dot{U}) - (\dot{Y})\} \quad (7)$$

그러므로 식(7)을 식(5)에 대입하고 다시 정리하면 다음과 같다.

$$([M] + [M_H])\{\ddot{Y}\} + ([C] + [C_H])\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = [M_H]\{\ddot{U}\} + [C_H]\{\dot{U}\} \quad (8)$$

여기서 보면 동적 시스템의 운동방정식은 파일의 구조 질량에다가 유동에 의한 부가질량이 더해졌으며 감쇠행렬도 구조감쇠에 유동에 의한 감쇠가 더해짐을 알 수 있다. 따라서 식(8)을 유한요소법으로 해석함으로써 동적거동을 구할 수 있게 된다. 한편 부가된 질량행렬 [M_H]와 감쇠행렬 [C_H]는 파일을 보요소로 모델링하고 그 형상함수를 이용하면 하나의 유한요소에 대해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[M_H] = M_H \int_l [N]^T [N] dz \cong \frac{M_H \ell}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[C_H] = \int_l C_H(z) [N]^T [N] dz \cong \frac{\ell}{6} \begin{bmatrix} 2C_H(z_1) + C_H(z_2) & 0 \\ 0 & C_H(z_1) + 2C_H(z_2) \end{bmatrix}$$

여기서 ℓ 은 요소의 길이를, [N]는 유한요소 형상함수 행렬이며 lumping 방법에 의해 대각선행렬로 근사화 시켰다. 세굴전과 세굴진전에 따른 가진하중 및 행렬들의 계산 결과를 표 3에 수록하였고 이를 모델링하여 고유진동수 해석, 주파수응답 해석 등을 수행할 것이다. 여기서 구속 지점은 그림 1의 가상고정지반이다.

4. 파일의 고유진동수 해석

식(8)에서 우변이 영인 제차방정식을 생각하면 다음과 같이 표현되고 이 방정식을 풀면 고유진동수를 구할 수 있다.

$$[\tilde{M}]\{\ddot{Y}\} + [\tilde{C}]\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = \{0\} \quad (10)$$

여기서 $[\tilde{M}] = [M] + [M_H]$, $[\tilde{C}] = [C] + [C_H]$ 이며 구조감쇠는 없는 것으로 가정하였다(즉, [C] = [0]). 식(10)의 시스템이 자유진동하면 그 응답을 $\{Y\} = \{Y_0\}^{est}$ 이라고 놓음으

표 3 세 가지 수심에 대한 유한요소 하중벡터, 부가질량 및 부가감쇠 행렬

NW 방향 최대 풍속 (d=18.6m)				NW 방향 최대 풍속 (d=22.9m)				NW 방향 최대 풍속 (d=24.6m)			
{F _{I(FE)} }	{F _{D(FE)} }	[M _{H(FE)}]	[C _{H(FE)}]	{F _{I(FE)} }	{F _{D(FE)} }	[M _{H(FE)}]	[C _{H(FE)}]	{F _{I(FE)} }	{F _{D(FE)} }	[M _{H(FE)}]	[C _{H(FE)}]
472.74	94.01	380.96	120.71	572.56	112.73	469.03	146.20	611.22	119.93	503.85	156.07
797.99	135.14	761.92	203.76	930.45	150.98	938.06	237.59	978.59	156.29	1007.70	249.88
615.07	80.29	761.92	157.05	675.22	79.51	938.06	172.42	693.45	78.48	1007.70	177.07
474.09	47.70	761.92	121.06	490.01	41.87	938.06	125.12	491.40	39.41	1007.70	125.48
365.45	28.34	761.92	93.32	355.61	22.05	938.06	90.80	348.22	19.79	1007.70	88.92
281.74	16.85	761.92	71.94	258.08	11.62	938.06	65.90	246.76	9.94	1007.70	63.01
217.25	10.02	761.92	55.47	187.31	6.12	938.06	47.83	174.87	4.99	1007.70	44.65
167.57	5.96	761.92	42.79	135.96	3.22	938.06	34.72	123.94	2.51	1007.70	31.65
129.32	3.55	761.92	33.02	98.70	1.70	938.06	25.20	87.85	1.26	1007.70	22.43
99.89	2.12	761.92	25.51	71.68	0.90	938.06	18.30	62.28	0.63	1007.70	15.90
77.27	1.27	761.92	19.73	52.10	0.47	938.06	13.30	44.18	0.32	1007.70	11.28
59.93	0.76	761.92	15.30	37.91	0.25	938.06	9.68	31.37	0.16	1007.70	8.01
46.67	0.46	761.92	11.92	27.66	0.13	938.06	7.06	22.32	0.08	1007.70	5.70
36.59	0.28	761.92	9.34	20.27	0.07	938.06	5.18	15.94	0.04	1007.70	4.07
29.02	0.18	761.92	7.41	14.99	0.04	938.06	3.83	11.47	0.02	1007.70	2.93
23.42	0.12	761.92	5.98	11.26	0.02	938.06	2.87	8.38	0.01	1007.70	2.14
19.41	0.08	761.92	4.96	8.69	0.01	938.06	2.22	6.29	0.01	1007.70	1.61
16.73	0.06	761.92	4.27	7.03	0.01	938.06	1.80	4.95	0.00	1007.70	1.26
15.20	0.05	761.92	3.88	6.10	0.01	938.06	1.56	4.21	0.00	1007.70	1.08
7.35	0.02	380.96	1.88	2.90	0.00	469.03	0.74	1.99	0.00	503.85	0.51
(N)	(N)	(kg)	(kg/sec)	(N)	(N)	(kg)	(kg/sec)	(N)	(N)	(kg)	(kg/sec)
3952.7	427.24	14476	1009.3	3964.5	431.73	17823	1012.3	3969.7	433.87	19146.2	1013.6

으로써 다음과 같은 고유치문제를 얻을 수 있다.

$$(s^2[\tilde{M}] + s[\tilde{C}] + [K])\{Y_0\} = \{0\} \quad (11)$$

여기서 $s = \alpha + i\omega$ 로써 복소수 고유값(complex eigen-value)에 해당한다. 표 3에서 표시된 행렬들을 NASTRAN 을¹¹⁾ 이용하여 모델링하고 식(11)에 의한 복소수 고유값 문제를 풀 결과는 표 4와 같다. 여기서 기본진동수들을 보면 세굴의 진행에 따라 $f_1 = \omega_1/2\pi = 0.54, 0.39, 0.34$ Hz 로 낮아짐을 알 수 있고 이는 파일의 외팔보의 길이가 늘어남과 아울러 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 부가질량 $[M_H]$ 의 값이 증가했기 때문이다. 유체의 영향을 고려하지 않은 건조한 파일의 기본 구조 고유진동수가 별도의 NASTRAN 해석결과에서 얻은 바에 의하면 $f_1 = 0.93\text{Hz}, 0.71\text{Hz}, 0.64\text{Hz}$ 임을 감안하면 해수의 영향으로 그 고유진동수가 상당히 낮아졌음을 알 수 있다.

표 4 해양 파일들에 대한 고유진동수

CASE	d=18.6m	d=22.9m	d=24.6m
f1	0.54 Hz	0.39 Hz	0.34 Hz
f2	3.05 Hz	2.27 Hz	2.04 Hz
REF f1 (Dry Pile)	0.93 Hz	0.71 Hz	0.64 Hz
Scouring	before scouring	4.3m scouring	6.0m scouring

5. 파력에 의한 파일의 주파수 응답 해석

파력을 받고 있는 파일의 운동방정식 (8)의 우변항은 파도에 의한 관성력 및 항력에 기인한 가진하중이다. 이는 선형화되었으며 Airy의 파도이론에 의한 식(2) 혹은 (3)은 조화함수로 표현되고 있으므로 정상상태의 동적거동인 주파수응답해석(frequency response analysis)을 수행함으로써 그 거동을 파악할 수 있다. 식(3)을 주파수(f) 함수 및 복소함수로 다시 쓰면,

$$u(f, z, t) = \left(\frac{f_0}{f}\right) u_{swl} K_A \cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L_A}\right] \cdot e^{i(2\pi t)} \quad (12)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이고 f_0 는 현재 다루고 있는 파도의 주파수 즉, NW방향 최대풍속조건에서 $f_0 = 1/T = 1/3.89 = 0.257\text{Hz}$ 이다. 따라서 식(8)의 우변 중 항력에 의한 유한요소 하중은 다음과 같다.

$$C_H(z) \cdot u(f, z, t) = C_H(z) \cdot \left(\frac{f_0}{f}\right) u_{swl} K_A \cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L_A}\right] \cdot e^{i(2\pi t)}$$

$$[C_H]\{U\} = \{F_D\} \cdot \left(\frac{f_0}{f}\right) e^{i(2\pi t)} \quad (13)$$

여기서 $\{F_D\}$ 는 유한요소 하중값으로 표 3에 표시한 바 있다. 한편, 관성력에 의한 가진력은 식(12)를 미분하여

$$\dot{u}(f, z, t) = i(2\pi f) u_{swl} K_A \cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L_A}\right] \cdot e^{i(2\pi t)} \quad (14)$$

이 되고 관성력에 의한 유한요소 가진하중은 다음과 같다.

$$M_H \cdot \ddot{u}(f, z, t) = M_H i(2\pi f_0) u_{SWL} K_A \cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L_A}\right] \cdot e^{i(2\pi ft)}$$

$$[M_H] \{\ddot{U}\} = \{F_1\} \cdot (i2\pi f_0) e^{i(2\pi ft)} \quad (15)$$

여기서 $\{F_1\}$ 는 유한요소 하중값으로 표 3에 표시하였다. 그러므로 관성력 및 항력에 의한 가진하중은 주파수 함수로서 다음과 같이 쓸 수 있고 이 값이 NASTRAN에 주파수 하중으로 입력되었다.

$$\{F(f)\} = \{F_D\} \cdot \left(\frac{f_0}{f}\right) + \{F_1\} \cdot (i2\pi f_0) \quad (16)$$

식(16)을 식(7)의 가진력에 대입하고 이의 정상상태 응답을 $\{Y\} = \{Y_0\} e^{i(2\pi ft)}$ 라 할 때 $\omega = 2\pi f$ 이므로 다음과 같이 된다.

$$(-\omega^2 [\tilde{M}] + i\omega [\tilde{C}] + [K]) \{Y_0(\omega)\} = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \{F_D\} + i\omega_0 \{F_1\} \quad (17)$$

NASTRAN을 이용하여 식(17)을 주파수대 $f = 0.1 \sim 0.8\text{Hz}$ 에 대하여 구한 결과를 파일 자유단 부의(파일의 상단 끝) 변위의 진폭으로 그림 2에 나타내었는데 여기에서 알 수 있는 바는 고유진동수 해석을 통해서 밝혔던 바와 같이 파일의 공진은 세굴의 진전에 따라 $f = 0.54, 0.39,$

0.34Hz근처이며 실제 파도의 가진 주파수는 $f_0 = 0.257\text{Hz}$ 로써 이에 못미치고 있다. 그림에서 보면 동적확대 효과가 세굴전에는 거의 없으나, 4.3m 세굴 및 6.0m 세굴시에는 얼마간 나타남을 알 수 있고 동적확대계수가 가장 큰 6.0m 세굴시에서의 가진 주파수 $f_0 = 0.257\text{Hz}$ 에 대한 주파수응답을 변위와 응력으로 구하여 표 5에 나타내었다.

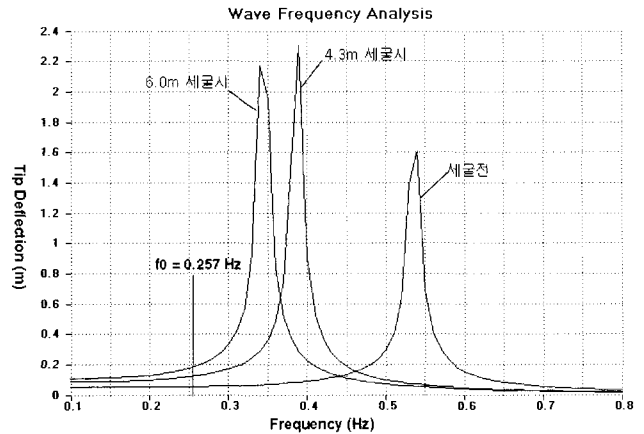


그림 2 해양파도에 의한 파일의 변위응답 스펙트럼

가장 열악한 경우인 6.0m 세굴후 NW 방향 최대 풍속 파도시의 표 5에서 보면 변위의 진폭은 파일 끝단에서 최

표 5 해양파도에 의한 변위 및 굽힘응력 응답 스펙트럼

NW 방향 최대풍속 (d=24.6m)				Displ. (mm)		Stress(N/cm ²)			
Node No	z (m)	Displ. (mm)	Stress (N/cm ²)	0	100	200	0	2,500	5,000
100	7.00	186.2	0.2	100	200	0	0	2500	5000
101	6.00	179.3	0.8	102	202	0	0	2500	5000
102	5.00	172.5	3.6	104	204	0	0	2500	5000
103	4.00	165.6	8.2	106	206	0	0	2500	5000
104	3.00	158.7	14.4	108	208	0	0	2500	5000
105	2.00	151.8	22.3	110	210	0	0	2500	5000
106	1.00	145.0	31.8	112	212	0	0	2500	5000
107	0.00	138.1	42.2	114	214	0	0	2500	5000
108	-1.29	129.2	83.0	116	216	0	0	2500	5000
109	-2.59	120.4	166.3	118	218	0	0	2500	5000
110	-3.88	111.5	282.4	120	220	0	0	2500	5000
111	-5.18	102.8	424.5	122	222	0	0	2500	5000
112	-6.47	94.1	587.8	124	224	0	0	2500	5000
113	-7.77	85.5	768.4	126	226	0	0	2500	5000
114	-9.06	77.1	963.7	100	200	0	0	2500	5000
115	-10.36	68.9	1171.2	102	202	0	0	2500	5000
116	-11.65	60.9	1389.1	104	204	0	0	2500	5000
117	-12.95	53.2	1615.8	106	206	0	0	2500	5000
118	-14.24	45.8	1850.1	108	208	0	0	2500	5000
119	-15.54	38.8	2090.5	110	210	0	0	2500	5000
120	-16.83	32.2	2336.2	112	212	0	0	2500	5000
121	-18.13	26.1	2586.2	114	214	0	0	2500	5000
122	-19.42	20.4	2839.6	116	216	0	0	2500	5000
123	-20.72	15.4	3095.6	118	218	0	0	2500	5000
124	-22.01	11.0	3353.6	120	220	0	0	2500	5000
125	-23.31	7.2	3613.1	122	222	0	0	2500	5000
126	-24.60	4.2	3873.6	124	224	0	0	2500	5000

대 ±186mm이며, 응력은 해저 지반부에서 최대 ±3,874 N/cm²으로써 항복응력인 Y=23,500N/cm²에 비해 16% 시 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 제시된 파도에 의한 동적거동은 재료의 항복을 유발하지 않는 충분히 작은 것 이라고 할 수 있겠다.

6. 와류 방출에 의한 횡진동 해석

와류방출에 의한 진동현상은 기계시스템의 유체순환계 등에서 흔히 발생하는데 그러한 진동현상은 ASME 코드에서도 다루고 있다.¹²⁾ 본 논문의 수직파일에 대한 후방 와류(vortex) 발생 및 흐름은 그림 1에서 표시한 바와 같이 유속과 직교하는 수평방향의 양력(lift force) f_L을 발생시킨다. 원통을 통과하는 일정유속(u_c)에 의한 양력은 Strouhal에 의해 다음과 같은 진동수를 가짐이 알려져 있다.

$$f_s = \frac{N_s u_c}{D} \tag{18}$$

여기서 N_s는 무차원 Strouhal 수로서 원통의 경우 약 0.2의 값을 갖는다.¹³⁾ 따라서 실험적으로 알 수 있는 양력 계수 C_L을 이용한다면 이러한 와류에 의한 가진력은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$f_L \cong C_L \frac{\rho D}{2} u_c^2 \cos(2\pi f_s t) = \left(\frac{C_L}{C_D}\right) f_{Dc} \cos(2\pi f_s t) \tag{19}$$

여기서 f_{Dc} = C_DρDu_c²/2로서 일정 조류속에 의한 항력이다.

한편, 파도에 의한 vortex 유발진동은 훨씬 복잡한 현상이므로 파도에 의한 유속이 시간 및 깊이에 따라 변동하기 때문이다. 파도에 의한 양력의 발생조건은 Keulegan-Carpenter에 의해 다음과 같은 조건으로 밝혀졌다.¹⁴⁾

$$N_{KC} = \frac{T u_m}{D} \geq 15; \quad \bar{N}_{KC} = \frac{T \bar{u}_m}{D} \geq 3 \tag{20}$$

여기서 N_{KC}는 Keulegan-Carpenter 수이고 u_m은 식 3)에서 최대 유속을 의미하고, \bar{u}_m 는 깊이에 대한 평균 유속 즉, $\bar{u}_m = (u_{swl} + u_{bot})/2$ 이다. 파도에 의한 양력의 값은 식(19)와 유사하게 구할 수 있으나 유속의 변동으로 인해 다음과 같은 급수 형태로 쓰여진다.¹⁵⁾

$$f_L = \frac{\rho D}{2} u_m^2 \sum_{k=1}^K C_L^k \cos(k \cdot \omega_0 t + \phi_k) \tag{21}$$

여기서 ω₀는 파도의 각주파수이고 C_L^k는 각 조화함수에 대한 N_{KC}의 함수인 양력계수이다. 현재의 문제는 파도에 의한 식(20)의 값이 N_{KC} = 4.0, $\bar{N}_{KC} = 2.0$ 으로써 각각 15 및 3에 크게 못미치므로 파도에 의한 후방와류에 의한 양력의 발생은 없다고 할 수 있다. 그러나 조류에 의한 영향은 식(18)에 의한 후방와류 유발 가진주파수가 세굴전의 조류속 1.17m/s에 대해서는 f_s = 0.288Hz, 4.0m 세굴후의 조류속 1.9m/s에 대해서는 f_s = 0.467Hz, 6.0m 세굴후의 조류속 2.5m/s에 대해서는 f_s = 0.615Hz이고 파일구조물의 공진주파수가 세굴의 진전에 따라 f=0.54, 0.39, 0.34Hz 근처이므로 동적확대가 있을 것으로 판단된다. 따라서 식(19)에 의한 가진력을 이용해 주파수 응답해석을 해 보기로 한다. 일정 조류속에 대한 정적인 유한요소 하중을 {F_D}라 할 때 식(19)에 의한 가진력은 식(13)으로 부터 식(16)까지와 유사한 과정을 거쳐 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \{F_L(t)\} &= \{F_{Dc}\} \left(\frac{C_L}{C_D}\right) \cdot e^{2\pi i f_s t} \\ \{F_L(f)\} &= \{F_{Dc}\} \left(\frac{C_L}{C_D}\right) \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 \end{aligned} \tag{22}$$

여기서 C_L/C_D 값은 문헌으로부터³⁾ 읽은 값 0.1을 적용하였다. 이와 같은 가진력에 대한 응답 스펙트럼 결과를 파일 자유단 부의(그림 1) 변위의 진폭으로 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보면 세굴전에는 f_s = 0.288Hz < f = 0.54Hz 이므로 공진을 겪지 않으나 4.3m 및 6.0m 세굴후에는 모두 가진력의 진동수가 고유진동수보다 높으므로 조류속이 이르는 동안에 공진을 겪게 됨을 알 수 있다.

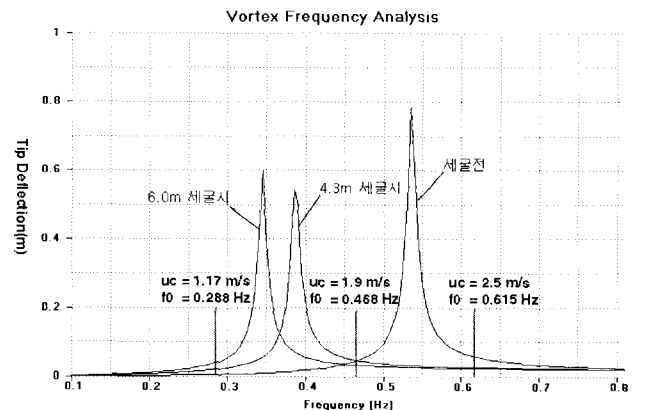


그림 3 조류 후방와류에 의한 변위 응답 스펙트럼

따라서 조류 와류의 유발로 인한 파일의 공진에서의 응답을 보면 그림 3에서 나타낸 바와 같이 4.3m세굴후 1.9 m/s 조류에서 끝단의 변위가 $\pm 593\text{mm}$ 이며, 응력은 지지부에서 최대 $\pm 13,710\text{N/cm}^2$ 이고 (표 6a), 6.0m세굴후 2.5m/s 조류에서 끝단의 변위가 $\pm 601\text{mm}$ 이며 응력은 지지부에서 최대 $\pm 12,696\text{N/cm}^2$ 으로써 (표 6b) 모두 항복응력인 $Y=23,500\text{N/cm}^2$ 을 초과하지는 않으나 그 값이 작지 않음을 알 수 있다. 이는 조류양력에 의한 동적확대가 나타나는 것으로써 공진에 의한 동적영향이 지대함을 알 수 있다. 특히 공진시에는 응력 값이 항복응력의 60%에 달하므로 안전율의 적용에 신중을 기해야 함을 알 수 있다.

만약에 조류에 기인한 와류 유발 진동과 파도에 의한 진동이 동시에 일어난다면 더욱 복잡한 상황이 초래될 것이다. 이 두 가지를 엄밀하게 해석적으로 다룰 수 있는 방법은 없다. 그러나 설계의 관점에서 본다면 보수적인 접근법으로서, 예를 들어 파도에 의한 결과 표 5와 조류양력에 의한 결과 표 6의 응력 결과를 직교방향으로 조합하는 방법으로 구할 수도 있을 것이다.

7. 결 론

본 논문에서 새로이 제안하는 해수 지반에 수직으로 시

추된 개별파일의 동적 거동해석의 절차는 다음과 같다.

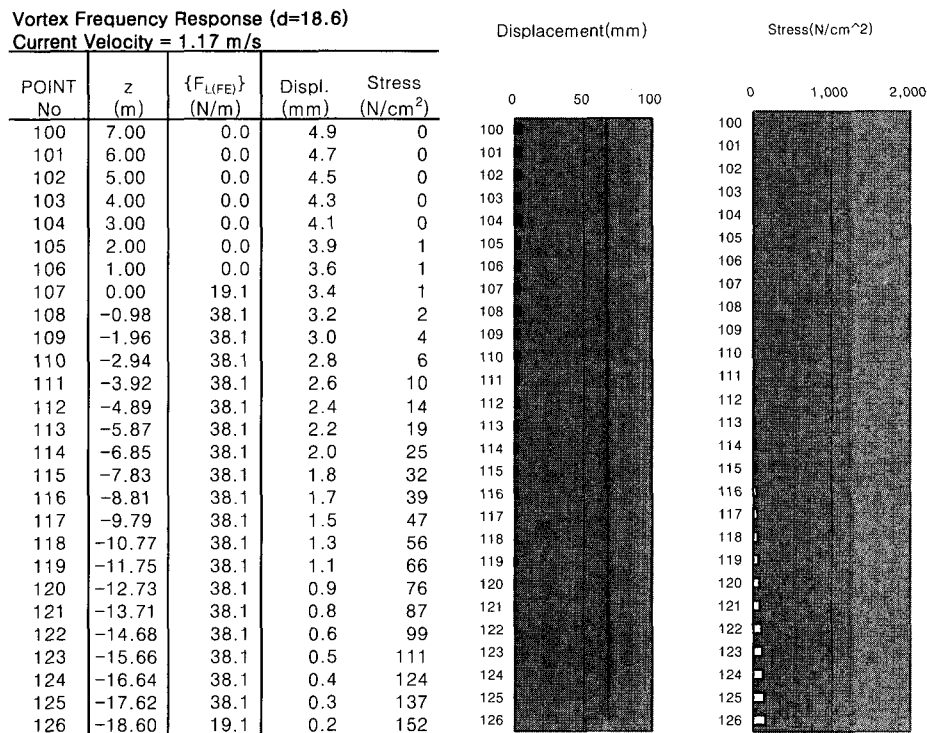
파도에 대한 거동을 분석하기 위해서는 먼저 파도의 제원과 해수의 깊이, 파일의 직경에 따라 Airy의 파도이론의 적용 타당성 여부를 검토한다. 그 적용이 타당한 경우에는 파도이론에 대응하는 레이놀즈 수를 구하고 관성계수와 항력계수 등을 문헌으로부터 얻은 후 유한요소망에 맞게 표 3과 같은 절점력, 부가질량행렬, 부가감쇠행렬을 계산한다. 그리고 그러한 값들은 유한요소 구조모델에 추가하여 입력하고 해석하여 고유진동수(표 4) 또는 응답스펙트럼(표 5) 결과를 얻는다.

조류의 후방와류에 의한 가진응답을 얻기 위해서는 항력계수와 Strouhal 진동수를 얻은 후 식 (22)에 해당하는 가진력으로 입력하고 그림 3 및 표 6과 같은 주파수 응답해석 결과를 얻는다.

본 논문에서 제시된 설계문제에 대해서는 고유진동수가 세굴의 진행에 따라 0.54Hz로부터 0.34Hz까지 낮아졌고(표 4) 진동수가 0.257Hz인 NW방향 최대풍속시 파도에 의한 가진력에 대해서는 6.3m 세굴후에 최대응력이 항복응력의 16%에 달하는 것으로 나타났다(표 5).

조류 후방와류 가진에 의한 동적거동해석의 결과는 세굴전에는 공진을 겪지 않았지만 4.3m 세굴후나 6.0m 세굴후에는 모두 공진을 겪게 되며(그림 3) 공진시의 응력은

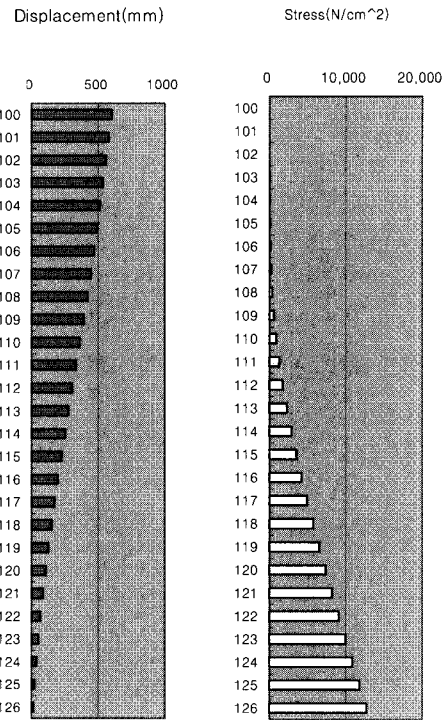
표 6 조류 후방와류에 의한 변위 및 굽힘응력 응답 스펙트럼



(a) 세굴 전

Vortex Frequency Response (d=24.6m)
Current Velocity = 1.40 m/s

POINT No	z (m)	{F _{L(FE)} } (N/m)	Displ. (mm)	Stress (N/cm ²)
100	7.00	0.0	601.0	1
101	6.00	0.0	578.9	5
102	5.00	0.0	556.8	21
103	4.00	0.0	534.7	47
104	3.00	0.0	512.6	84
105	2.00	0.0	490.5	130
106	1.00	0.0	468.5	185
107	0.00	115.1	446.4	245
108	-1.29	230.2	417.9	381
109	-2.59	230.2	389.5	608
110	-3.88	230.2	361.2	919
111	-5.18	230.2	333.1	1,308
112	-6.47	230.2	305.2	1,770
113	-7.77	230.2	277.7	2,298
114	-9.06	230.2	250.7	2,886
115	-10.36	230.2	224.3	3,528
116	-11.65	230.2	198.5	4,219
117	-12.95	230.2	173.6	4,954
118	-14.24	230.2	149.7	5,726
119	-15.54	230.2	127.0	6,530
120	-16.83	230.2	105.5	7,362
121	-18.13	230.2	85.6	8,217
122	-19.42	230.2	67.2	9,090
123	-20.72	230.2	50.7	9,978
124	-22.01	230.2	36.2	10,877
125	-23.31	230.2	23.9	11,784
126	-24.60	115.1	13.9	12,696



(b) 6.0 m 세굴 후

6.0m 세굴시 항복응력의 60%에 달하는 것으로 계산되었다. (표 6b)

이와 같은 동적거동해석 결과에 의한 응력수준은 모두 정적 항복응력에는 미치지 않고 있으나 굽힘에 의한 국부 파손이나 진동시의 굽힘의 반복으로 인한 피로파괴 측면에서의 추가적인 분석이 요구된다. 따라서 본 논문에서 구한 동적거동 해석결과는 파일의 파손을 평가하기 위한 국부좌굴 및 피로강도의 분석을 위해서 필요한 데이터가 되며, 이 때 구체적인 강도 및 파손에 관하여는 향후 연구가 필요하다 하겠다.

참고 문헌

- 오세욱, 민병형, 한건모, 이승희, "해양원주 구조물에 작용하는 파력에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제1권, 제2호, 1987, pp.204~214
- 류정선, 윤정방, 강성후, "해양 가이드 - 타워의 고정말뚝에 대한 신뢰도 해석," 전산구조공학, 제4권, 제3호, 1991, pp.117~127
- 조규남, 이근무, 최영철, "해저 석유개발을 위한 해양구조물의 기본설계/해석 및 실험기법 개발 - 해양구조물에 작용하는 파랑하중 산정에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제14권, 제1호, 2000, pp.6~10
- 김문겸, 임윤묵, 김민규, 조석호, "횡하중을 받는 지반-

- 말뚝 상호작용계의 동적 주파수 응답해석," 한국전산구조공학회논문집, 제13권, 제4호, 2000, pp.437~448.
- 조철희, 김병환, 김두홍, "해양 수직 파일에 작용하는 환경 하중하의 응력 해석 기법 비교," 한국전산구조공학회 2001년도 봄 학술발표회논문집, 2001, pp.121~127
- 김두홍, 조철희, 정우철, 박찬원, 나인삼, "2차원 다원주 주위의 유동 특성에 관한 실험적 연구 (I)," 한국해양공학회 2001년도 추계학술대회논문집, 2001, pp.190~195
- Nigham, N.C. & Narayanan, S., *Applications of Random Vibrations - Response of Offshore Structures to Wave Loading*, 1994, pp.407-487, Addison-Wesley Singapore Ltd.,
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. & Schaaf, S.A., "The force exerted by surface waves on piles," *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 189, 1950, pp.149~154
- Shore Protection Manual*, Vol. II, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984
- Borgman, L.E., "Spectral analysis of ocean wave force on piling," *J. Waterways and Harbors Div., Proc. ASCE*, 93(WW2), 1967, pp.124~156
- NASTRAN, National Aeronautics and Space Administrations, CSAR, 1996
- Au-Yang, M.K., Blevins, R.D. and Mulcahy, T.M., "Flow-Induced Vibration Analysis of Tube Bundles - A Proposed Section III Ap-

- pendix N Nonmandatory Code", *J. Pressure Vessel Tech.*, Vol. 113, 1991, pp.257~267
13. Dowell, E.A., Curtis, H.C. Jr., Scanlan, R.H. & Sisto, F., *A Mordern Course in Aeroelasticity*, Sijthoff & Noordhoff, 1980
14. Keulegan, G.H. & Carpenter, L.H., Force on cylinders and plates in an oscillating fluid," *J. of Research: National Bureau of Standards*, Vol. 60, No. 5, 1958. pp.423~440
15. Chakrabarti, S.K., Wolbert, W.A. & Tam, W.A., "Wave forces on vertical circular cylinder," *J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div., Proc. ASCE*, 102(WW2), 1976. pp.203~221