

## 해양 수직 파일(Vertical Pile)에 작용하는 환경 하중하의 응력 해석 기법 비교

### Comparison of stress analysis tools for ocean vertical pile under environmental loads

조 철 희\*      김 병 환\*\*      김 두 홍\*\*  
Jo, Chul-hee      Kim, Byoung-Hwan      Kim Doo-Hong

---

#### ABSTRACT

To investigate the stability and integrity of offshore structures, it is necessary to estimate the significant ocean environmental loadings. They include hydrostatic pressure, wind, wave, current, tide, ice, earthquake, temperature, marine growth and scouring. Waves are of major importance among them because of the large forces acting on submerged parts of the structure caused by accompanying water motions. For the comparison of stress and deflection analysis tools, a vertical pile is applied under environmental loads. The analysis is concerned with SACS(Structural Analysis Computer System), ANSYS and C program. SACS and C program have nearly the same results but not ANSYS. This study shows the comparison of results obtained from 3 different approaches.

---

#### 1. 서      론

해양 구조물(Offshore Structure)은 육상 구조물 보다 다양하고 복잡한 하중조건에 놓이게 된다. 그러므로 해양 구조물의 구조해석을 위해서는 우선적으로 여러 환경조건이 구조물에 미치는 하중의 크기를 결정해야 한다. 외부 환경 하중으로는 외부수압(Hydrostatic Pressure), 바람(Wind), 파도(Wave), 해류(Current), 조수(Tide), 빙하(Ice), 지진(Earthquake), 온도(Temperature), 마린 그로스(Marine Growth), 세굴(Scouring)등의 환경 하중(Environmental load)을 포함한다.<sup>(1)</sup>

본고에서는 해양 구조물의 단순한 형태인 수직 파일(Vertical Pile)을 해석하였다. 파일은 해저면(Sea Floor)에 고정된 외팔보와 같은 상태의 1차원 부재로 단순화하였고 바람, 파도, 해류(Wind, Wave, Current)의 해양 환경하중, 상판(deck)의 하중, 그리고 파일의 자중을 고려해서 해석을 하였다.

---

\* 정회원 · 인하대학교 선박해양공학과 교수

\*\* 인하대학교 선박해양공학과 석사과정

빙하지역을 제외하고는 일반적으로 대형 부유 및 고정 해양 구조물 부재에서는 파력이 가장 크게 비중을 차지하고, 파력(Wave Force)은 구조물의 부재치수와 입사파의 파장 비율에 따라 일반적으로 Froude Kriloff's Force, Diffraction Force, Radiation Force로 구분 할 수 있다.

해양 구조물의 수평 부재 치수(D)가 파장(L)에 비해 매우 작은 관계(일반적  $D/L < 0.05$ ,  $DnV 0.2$ )로 입사파의 동적 흐름(Kinematics of flow)이 교란되지 않는다고 가정하였을 경우 구조물의 침수 표면적에 작용하는 Froude Kriloff's Force가 적용되며 Morison 방정식으로 계산되어 간섭효과가 배제되므로 대칭적으로 해석이 가능하다.<sup>(2)</sup>

이러한 파일에 작용하는 외력을 SACS(Structure Analysis Computer System), ANSYS, C로 작성한 프로그램에 적용하여 해석 한 후 비교 분석한다. ANSYS와 C 프로그램은 파일을 여러 개의 요소로 분할하여 각 요소에 작용하는 환경하중을 분포하중으로 환산하여 각 요소에 대한 등가 하중으로 치환해서 계산을 하는 유한 요소법을 사용하였다. 등가하중으로 치환은 정확한 값이 아닌 근사적 값을 계산해 준다. 하중 적용을 위해 SACS와 C 프로그램은 바람, 해류(Wind, Current)에 대해서는 DnV 이론을, 파도는 Stokes 이론(Stokes Wave Theory 5th order)을 사용했다. (그림 1)

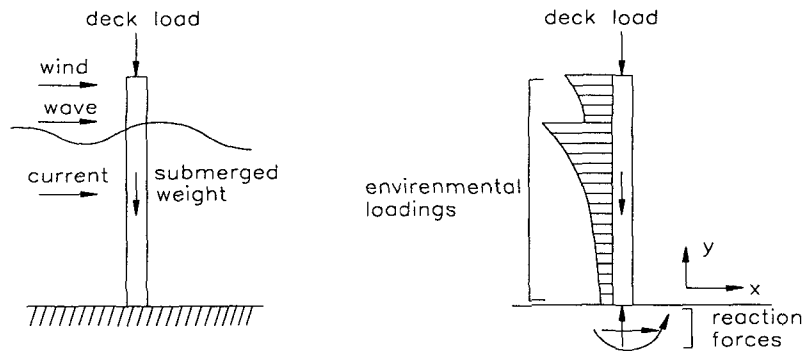


그림 1 . 수직 파일에 작용하는 해양 하중

## 2. 해양 환경 하중

해풍은 해양구조물의 상판 구조물(deck structure)에 동적 효과(dynamic effect)를 수중 부분(submerged part)에 굽힘 모멘트(over turning moment)를 주로 작용한다. 파 하중(wave load)은 해양구조물에 작용하는 외부하중 중 가장 큰 영향을 미치는데 해양구조물의 수중 부분(submerged part)에 큰 힘을 작용시킨다. 고정식 해양구조물의 설계에 있어서 해류는 보트 랜딩(boat landing)과 바지 범퍼(barge bumper) 위치와 방향 선정에 영향을 미치며 수중 부분(submerged parts)에 힘을 작용시킨다.

### 2.1 풍 하중(wind load)

바람은 어떤 속도를 가지고 움직이는 공기입자의 흐름이며 그 흐름의 중간에 방해물이 있게 되면 여기에 풍력이 작용한다.

### 2.1.1 풍력(wind force)

한 구조물에 작용하는 풍력은 크게 항력과 양력으로 이루어지고 항력은 압력 차이로 인해 흐름 방향으로 생기는 힘이며, 양력은 물체의 모양이나 위치 때문에 생기는 흐름 방향에 수직인 힘이다. 양력은 비대칭 물체에서만 발생한다. 수면 위로부터 높이가  $z$ 인 지점에 대한 전체 항력  $F_D$ 와 전체 양력  $F_L$ 은 다음과 같다.

$$F_D = \int_0^z f_D dz, \quad f_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 dA \quad (1)$$

$$F_L = \int_0^z f_L dz, \quad f_L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 dA \quad (2)$$

where,  $\rho$  = air density = 1.247 kg/m<sup>3</sup>

$V$  = wind velocity [m/s]

$dA$  = projected unit area of object [m<sup>2</sup>]

### 2.1.2 풍력의 작용범위

풍력의 작용범위는 평균수면(M.W.L.)으로부터 수면 위 파일의 끝 부분까지이다. 파일의 길이는 최대 파봉(Max. wave crest elevation)이 상부 구조물 아래로 적절한 여유(clearance)를 가질 수 있도록 고려되어야 한다. 이것은 상부 구조물에 발생할지도 모르는 부유 상 양력(buoyant uplift)과 직접적인 파력(direct wave force)을 피하기 위해 에어 갭(air gap) 이라고 하는 안전율(safety margin)이 고정 구조물 높이 결정 시 고려되어야 한다. 보통 1.5m의 에어 갭을 두기도 하고 파고(wave height)의 1/10을 잡기도 한다. 여기에서는 파고의 1/10을 에어 갭으로 잡아 파일의 길이를 다음과 같이 결정한다. (식 3) (그림 2)

$$\text{파일 길이(Pile Length)} = h + \text{crest} + \frac{H}{10} \quad [m] \quad (3)$$

### 2.2 파 하중(wave load)

수직 파일에 대한 수평방향의 파력은 수입자 가속도에 의한 관성력과 마찰, 경계층 효과(boundary layer effect)에 의한 항력으로 대별된다. 가속되는 유체 속의 고정 물체는 여기에 가해지는 유체의 층(layer) 때문에 힘을 받게된다. 파력은 Morison 방정식으로부터 계산된다. (식4) (그림 3)

$$F_{Tm} = F_{im} + F_{dm} = \int_{-d}^{\eta} \rho C_1 \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} dz + \int_{-d}^{\eta} \frac{\rho}{2} C_D u |u| D dz \quad (4)$$

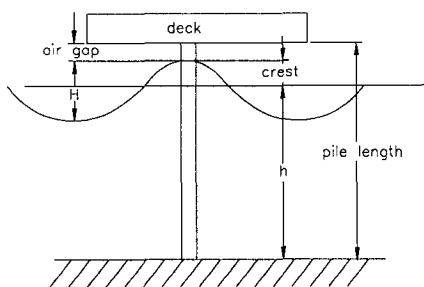


그림 2 . 풍력의 작용범위

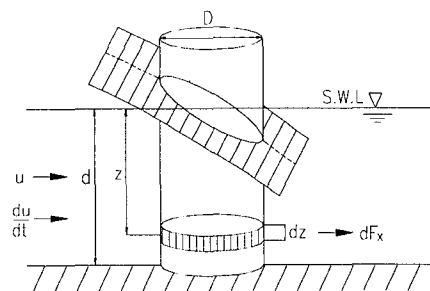


그림 3 . 파일에 작용하는 파 하중

### 2.3 해류 하중(Currents Load)

특정 위치에서 실제 해류는 여러 가지 형태의 합으로 이루어져 있으므로 설계 인자(design parameter)를 결정하기 위해서 실측을 하거나 기록된 자료를 사용한다.

해류 하중을 구하는데 가장 중요한 요소는 최대 설계속도를 구하는 것이다. 연직 방향의 속도분포를 구하여야 하며 강이나 폭이 좁은 수로(channel)에서는 수평방향의 속도분포를 고려한다.

해류의 설계 속도는 자세한 실측자료가 없을 때에는 DnV 공식(DnV rule)을 참조하여 계산한다.<sup>(3)</sup>

### 3. 구조 해석 이론

해양 구조물의 수직 파일에 대해 작용하는 하중은 그림1에서와 같이 파도, 해류, 바람에 의한 하중과 파일이 지지하는 상판에 의한 하중, 파일의 자중 등이 있다. 이 때 파일을 n개의 요소로 분할하면 i 번째 요소 (i = 1, 2, ..., n)에 대한 하중은 그림 4와 같으며, 보에 대한 균일 분포하중을 정적으로 등가인 하중으로 나타내면 그림 5와 같다.

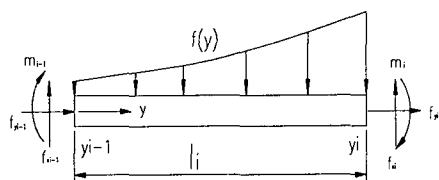


그림 4 . 파일의 i번째 요소에 작용하는 하중

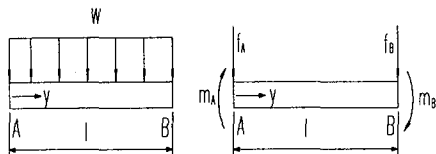


그림 5 . 분포하중과 그 등가하중

여러 복합 하중을 받는 파일의 구조해석을 위해서는 파일을 여러 개의 세분화된 요소로 분할한다. 이 때 각 요소의 분할에 있어서 그 요소의 길이는 같지 않아도 된다.

파일에 대한 강성 매트릭스는  $\alpha=90^\circ$  이므로  $\lambda=0$ ,  $\mu=1$ 을 적용하면 강성매트릭스는 식 (7)과 같이 나타난다.

$$[k] = \frac{E}{l} \begin{pmatrix} \frac{12I}{l^2} & & & & & & \\ 0 & A & & & & & \\ & & \text{Symmetric} & & & & \\ \frac{6I}{l} & 0 & & 4I & & & \\ -\frac{12I}{l^2} & 0 & & \frac{-6I}{l} & & \frac{12I}{l^2} & \\ 0 & -A & & 0 & & 0 & A \\ \frac{6I}{l} & 0 & & 2I & & \frac{-6I}{l} & 0 & 4I \end{pmatrix} \quad (7)$$

유한 요소의 기초 이론 식으로부터 파일을 m개의 요소로 나눈 경우  $i$ 번째와  $i+1$ 번째의 강성매트릭스를 전 요소에 대하여 구한 후 이들을 중첩시켜 전 요소에 대한 강성 매트릭스를 구한다.

파일의 해저면(sea floor)은 고정단으로, 상판 하중(deck load)이 작용하는 부분은 자유단으로 본다면 해저면에 대한 경계조건과 해저면 이외의 절점(node)에 대한 조건을 이용해서 강성방정식에 대한 각 절점의 변위를 구한다. 각 절점의 변위를 각 요소별 강성매트릭스에 곱해서 각 요소에 대한 내력을 구하고 이로부터 응력을 계산한다.<sup>(4)(5)</sup>

#### 4. 파일의 구조 해석 결과

##### 4.1 구조 해석 조건

각각의 프로그램에 적용할 환경 자료와 파일 조건은 표 1과 같다.

표 1. 파일 조건과 환경 자료

Water depth	25 [m]	Pile diameter	1.3 [m]
Wave height	11 [m]	Pile length	33 [m]
Wave length	125 [m]	Deck load	50 [KN]
Wave period	9.16 [s]	Material	Mild steel
Wind velocity	10 [m/s]	Specific weight	7.850 [ ton/m <sup>3</sup> ]
Current velocity	0.85 [m/s]	Young's modulus	2.08×10 <sup>2</sup> [ GN/m <sup>2</sup> ]
Drag coeff.	1.0	Yield stress	240 [ MN/m <sup>2</sup> ]
Inertia coeff.	2.0		

SACS와 C프로그램에 의하여 구해진 풍 하중, 파 하중, 해류 하중을 비교한 후 적당한 하중 값을 ANSYS 프로그램에 사용시 절점(node)에 집중하중으로 대입하여 각각의 경우에 대해 해석한 후 최종적으로 응력과 변위를 비교 분석한다. (그림 6)

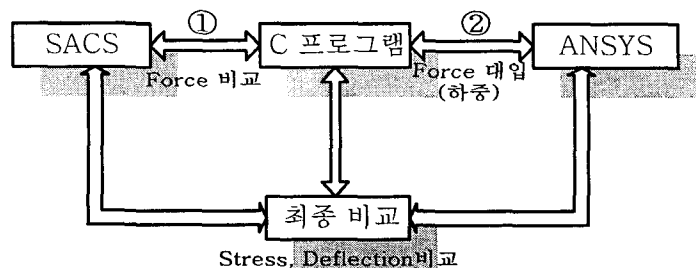


그림 6. 구조 해석 비교

#### 4.2 각 프로그램에 의한 해석결과 비교

평균수면 아래 부분은 -로 평균수면의 위로부터 파일 끝까지는 +로 잡았다.

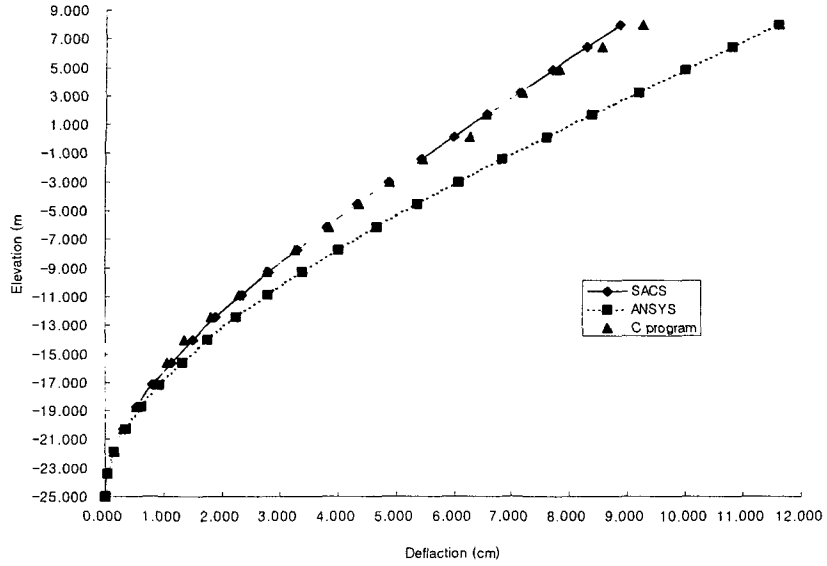


그림 7. Deflection 비교

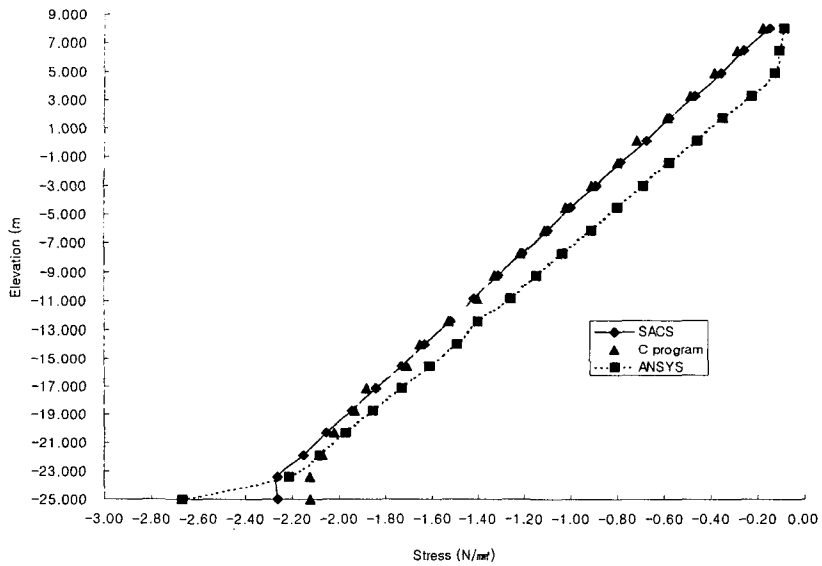


그림 8. Stress 비교

SACS, ANSYS, C 프로그램을 이용하여 각각 구한 변위는 ANSYS 해석시 일반 빔이나 솔리드 두가지 경우에 대해서 해석을 수행하였고 그림 7과 같이 일정한 형태로 비슷한 모습을 나타낸다. ANSYS의 경우 평균수면 위로의 값들은 파 하중의 영향을 집중하중으로 절점에 직접 가함으로 인해 변위가 크게 나타나는 경향이 있다.

응력 해석 결과는 SACS와 C 프로그램 모두 거의 일치하나 ANSYS의 경우 솔리드의 메쉬(mesh) 상태에 따라 절점(node)이 달라지고 특정 절점의 응력을 찾아 비교하기가 상당히 어렵다. 응력값 또한 그림 8에서 보이는 바와 같이 많은 차이를 나타내고 있었다. 그러나 ANSYS의 경우 다양한 형태의 응력을 찾아 낼 수 있다는 점에서 유용한 해석 기법이었고, SACS와 C 프로그램의 경우 대체로 간단한 형태로 응력을 해석할 수 있었으며 변위를 찾아내는 데는 별 어려움이 없었다.<sup>6)(7)</sup>

## 5. 결 론

일반 해양 구조물에 작용하는 외부 환경중 파 하중이 가장 크게 차지하는데 이로 인한 SACS와 C 프로그램의 결과를 비교 할 때 변위 오차는 작게 나타나고 ANSYS는 약간의 차이를 보이는 이유는 파 하중 입력시 단순한 집중하중으로 처리하여 절점(node)에 작용시킴으로서 오차가 발생되었다고 판단된다.

응력 차이는 ANSYS 프로그램은 특정 응력을 많은 절점(node)사이에서 구분하기가 어렵고 SACS와 C 프로그램의 경우 간단한 축응력 만으로 결정해서 큰 차이가 발생했다고 판단된다.

SACS와 같이 특정목적의 프로그램을 사용치 못할 경우 간단한 변위는 외력을 이론식으로 계산한 후 ANSYS에 입력하여 계산한다면 좋은 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

파일은 직경을 좀더 증가시키면 굽힘 강성이 커지므로 이에 따라 허용 응력이 증가되므로, 부재의 무게를 줄이기 위해 중공(中空)파일이 적용될 수 있다. 그러나 직경이 증가함에 따라 파일에 작용하는 파의 관성력(wave inertia force)이 커지게 되므로 지속적인 직경의 증가보다는 파일 두께를 고려하여야 한다.

## 참 고 문 헌

1. G. Clauss, E. Lehmann, C. Ostergaard 공저, "해양구조물공학", 미리내, 1995
2. 이재신, "해양 구조물 설계 개요", 광문 출판사, 1989
3. 과학기술처, "해저 석유개발을 위한 offshore platform 설계기술 개발", 1985
4. Thomas H. Dawson, "Offshore Structural Engineering", Prentice-Hall, INC, 1983,
5. Daryl L. Logan, "A First Course in Element Method", PWS, 1992
6. EDI, "SACS Manual", Engineering Dynamics, INC, 1997
7. 손창현, "유한요소해석 입문과 선형해석", 도서출판 계림, 태성에스엔이, 1999