

## 지반의 강성특성을 고려한 지반-돌핀구조계의 동적해석

이진학\* · 오세봉\*\* · 윤정방\*\*\* · 홍섭\*\*\*\* · 김진하\*\*\*\*

(98년 5월 22일 접수)

### Dynamic Analysis of Mooring Dolphin System Considering Soil Properties

Jin-Hak Yi\* · Se-Boong Oh\*\* · Chung-Bang Yun\* · Sup Hong\*\*\* · Jin-Ha Kim\*\*\*\*

**Key Words** : Soil-Pile Interaction(지반말뚝상호작용), Mooring Dolphin Structure(계류돌핀구조물), Nonlinear Dynamic Analysis(비선형동적해석), Newmark  $\beta$  Method(Newmark  $\beta$  방법), Subgrade Reaction Method(지반반력법)

### Abstract

In this paper, the dynamic analysis of a dolphin system for mooring a floating structure such as barge mounted plant is studied. The characteristics of the soil-pile system are simplified by a set of equivalent spring elements at the mudline. To evaluate the equivalent spring constants, the finite difference method is used. Since the characteristics of the soil-pile system are nonlinear in case of soft foundation, the nonlinear dynamic analysis technique is needed. The Newmark  $\beta$  method incorporating the modified Newton-Raphson method(initial stiffness method) is used. A numerical analysis is performed on two mooring dolphin systems on soft foundation and rock foundation. In case of the rock foundation, the characteristics are found to be nearly linear, so the linear dynamic analysis may be sufficient to consider the foundation effect. But in case of soft foundation, the non-linearity of the foundation appears to be very significant, so the nonlinear dynamic analysis is needed.

### 1. 서론

해양공간의 이용과 관련하여 대형플랜트, 원자력 발전소, 공항 등을 해상에 설치하고자 하는 노력이 국내외에서 시도되고 있다. 이러한 노력은 주로

부유식구조물에 대한 연구와 동시에 이루어지게 되었는데, 이는 부유식구조물의 형태가 설치공간 및 작업공간의 확보에 용이하고, 수심에 대하여 큰 영향을 받지 않을 뿐 아니라, 경제성 측면에서도 유리하기 때문이다. 우리 나라에서도 해상 소각 및

\* 한국과학기술원 토목공학과

\*\* 영남대학교 토목공학과

\*\*\* 중신회원, 한국과학기술원 토목공학과

\*\*\*\* 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

담수화를 위한 BMP(Barge Mounted Plant) 프로젝트<sup>1)</sup>가 한국기계연구원을 중심으로 진행 중이다.

부유구조물의 계류시스템에 대한 연구는 Thompson *et al.*<sup>2)</sup>, Troesch<sup>3)</sup> 등을 비롯하여 많은 연구자들에 의하여 수행되어졌다. Thompson *et al.*은 Articulated Mooring Tower에 대하여 비선형 복원력을 고려한 비선형해석을 수행하고, 이들의 카오스적 거동에 대한 분석을 수행하였다. 한편, Troesch는 지반과 계류시스템, 그리고 파동력의 비선형성을 고려하기 위하여, 이들을 등가의 비선형복원력을 갖는 스프링으로 고려하고, 부유체를 강체로 고려한 단자유도모델을 제안하였으며, 이 단자유도모델을 이용하여 여러 가지 비선형거동특성을 분석하였다. 그러나 이들의 연구에서는 부유체의 동적거동해석에 관점을 두고 있음으로 인하여 하부구조물인 계류돌핀구조물에 대해서는 깊은 연구가 이루어지지 않았다.

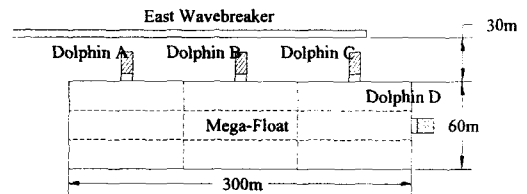
본 연구에서는 BMP와 같은 대형부유구조물의 계류를 위한 지반-돌핀구조계에 대하여 지반의 강성을 고려한 동적해석을 다루었다. 우선, 유한차분법을 이용하여 하부구조인 지반-말뚝계의 거동특성을 해석하였으며, 그 결과를 이용하여 해저지표면에서의 등가스프링요소의 강성을 추정하고, 이를 상부구조인 돌핀구조물의 동적해석에 이용하였다. 이때, 연약지반 혹은 토사지층과 같이 지반-말뚝계의 거동이 비선형인 경우 비선형성을 고려한 해석이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 modified Newton-Raphson 방법과 Newmark  $\beta$  방법을 병합 이용하여 해석을 수행하였다.

예제해석은 현재 제안된 BMP 계류돌핀구조물에 대하여 수행하였는데, 설치될 지반조건을 토사지층과 암반지층으로 크게 나누어 해석하였다. 거제도 연안의 해상 지반조사결과를 이용하여 토사지층과 암반지층의 지반물성치를 추정하였으며, 그 결과를 이용하여 지반-말뚝계의 거동특성을 규명하였다. 토사지층의 경우 지반의 비선형성의 영향이 크고, 암반지층의 경우 지반의 비선형성의 영향이 작은 것으로 규명되었다.

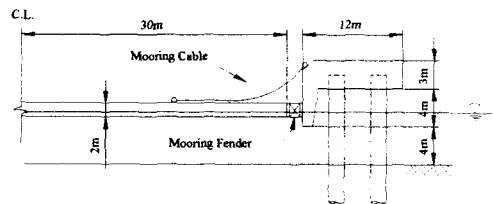
## 2. 구조물의 모형화 및 운동방정식

### 2.1 지반-돌핀구조계의 모형화

Fig. 1에서는 일본에서 추진중인 메가플로트프로젝트에서 사용된 부유체와 계류돌핀구조물의 위치 및 전체적인 치수를 보여주고 있다<sup>4)</sup>. 메가플로트에서의 계류돌핀구조물은 Fig. 1-b 에서와 같이 몇 개의 파일과, 파일을 일체로 만드는 콘크리트블럭(pile cap), 그리고, 부유구조물로부터 주어지는 충격을 흡수하기 위한 펜더(fender)와 부유구조물을 잡아주기 위한 케이블(mooring cable)로 구성되어 있다.



a) Location of dolphins



b) mooring dolphin system

Fig. 1 Locations and layout of dolphin used in megafloat project

본 논문에서는 해저지표면 아래의 말뚝과 지반의 영향을 함께 고려하여 지반-말뚝계로 정의하고, 강관파일, 즉 돌핀과 콘크리트블럭을 함께 고려하여 계류돌핀구조물로, 그리고 계류돌핀구조물과 지반을 모두 고려한 시스템을 지반-돌핀구조계로 정의하였다.

다음의 Fig. 2와 같이 지반-말뚝계의 거동특성을 해저지표면에서의 수평, 수직 및 회전강성을 갖는 비선형스프링요소로 치환하여 지반-돌핀구조계를 근사적으로 해석하였다.

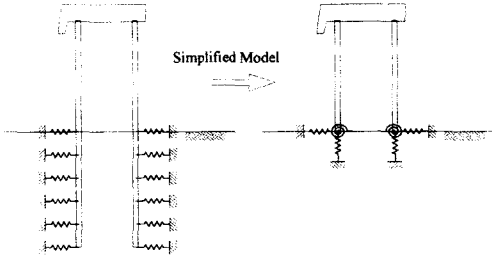


Fig. 2 Simplified model using equivalent springs considering soil-pile interaction

상부구조인 돌핀구조물의 파일시스템은 보요소를 이용하여 모형화할 수 있다. 본 연구에서는 단면의 2차 모멘트가 일정한 관형부재(tubular member)로 고려하였으며, 이에 대한 질량행렬, 강성행렬, 감쇠행렬은 각각 다음의 식 (1) - 식 (4)와 같다.

$$M^{(e)} = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 140/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 22l & 0 & 0 & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 70l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13l & 0 & 156 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 54 & 0 & -13l & 0 & 0 & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70l/A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140/l & 0 \\ 0 & 0 & 13l & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 0 & 4l^2 \\ 0 & -13l & 0 & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & -22l & 0 & 0 & 0 & 4l^2 \end{bmatrix} \quad \text{Symmetric} \quad (1)$$

$$+ \frac{\rho A l^2}{30L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3l & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -36 & 0 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -36 & 3l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3l & 0 & -l^2 & 0 & 0 & 0 & 3l & 0 & 4l^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4l^2 \\ 0 & 3l^2 & 0 & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 3l & 0 & 0 & 0 & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ ,  $A$ ,  $l$  은 각각 구조물 요소의 밀도, 단면적, 길이를 의미한다. 구조물이 유체내부에서 운동함으로써 발생하는 부가질량효과를 고려하기 위한 부가질량행렬(added mass matrix)은 단면의 형상에만 관계되는 것으로서, 원형단면의 경우 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$M^{(e)} = \frac{(C_M - 1)\rho \nabla}{420} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 156l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22F & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54l & 0 & 0 & 0 & 0 & 13l^2 & 0 & 156l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 54l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 156l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13l^2 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & 0 & -22l & 0 & 4l^2 \\ 0 & -13l^2 & 0 & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 22l & 0 & 0 & 0 & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $C_M$  은 유동의 관성계수,  $\rho$  는 해수밀도,  $\nabla$  은 부재의 단위길이당 배수용량이다. 한편, 해석에서 사용된 요소강성행렬은 식 (3)과 같다.

$$K^{(e)} = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12EI/l^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -EA/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4EI/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/l^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI/l^2 & 0 & EA/l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -12EI/l^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12EI/l^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2EI/l & 0 & 0 & -6EI/l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2EI/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2EI/l & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Symmetric} \quad (3)$$

위에서  $EI$ ,  $l$  은 각각 보요소의 휨강성(rotational rigidity)과 길이를 의미한다.

구조물의 감쇠행렬로는 비례감쇠의 일종인 Rayleigh 감쇠계수를 사용하여, 다음의 식 (4)와 같이 구하였다.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$  와  $\beta$  는 구조재료에 따라 결정되는 Rayleigh의 감쇠계수로써, 구조물의 거동에 지배적인 2개 진동모드의 고유진동수와 감쇠비를 이용하여 결정할 수 있다.

## 2.2 지반-말뚝계의 거동특성

말뚝지지형 돌핀에 대하여 하중조건과 현장조건, 시공방법 등을 고려하여 축하중에 대한 두부에서의 하중-변위 관계에 대한 유한차분해석을 수행하였다. 그리고 해양 구조물에서 핵심적인 역할을 하는 횡하중에 대한 말뚝의 거동을 지반반력법을 이용하여 해석하였다<sup>5)</sup>.

축하중 재하시 지반-말뚝계의 거동을 모의하기 위하여 말뚝을 일축부재로 모형화하여 탄성 스프링으로 고려하였다. 그리고 말뚝주면의 지반은 깊이 에 따라 상이한 비선형 스프링으로 모델하고 말뚝 선단 직하부의 지반거동은 또 하나의 비선형 스프링으로 모형화할 수 있다. 이러한 해석을 하는 경우 핵심적인 역할을 하는 지반의 거동은 전단 저항-변형 관계를 나타내는  $t-2$  곡선 및 선단 저항-변형간의 관계를 나타내는  $Q-2$  곡선을 이용하여 모형화한다. 본 연구에서는 해양구조물의 하부기초로서 깊은 기초에 대하여 통상적으로 적용

하는 API의 설계지침<sup>6)</sup>을 적용하였다. 한편 암반에 관입하는 천공말뚝의 축하중에 대한 지지력은 FHWA<sup>7)</sup>의 지침을 적용하였다.

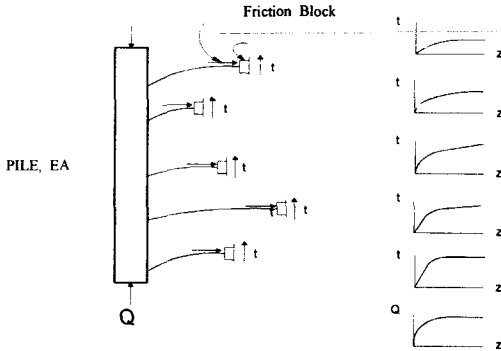


Fig. 3 Subgrade reaction model for axial force-resisting pile

횡하중이 가해지는 지반-말뚝계는 말뚝을 보로 간주하고 지반을 선형적 또는 비선형적인 스프링으로 모형화하여, 유한차분적으로 해를 구할 수 있다. 이러한 기법을 지반반력법(subgrade reaction method)이라고 한다<sup>7)</sup>. 횡하중에 대한 지반의 거동은 축하중에 대한 거동과 상이하게 나타나므로, 말뚝의 수평변위  $y$ 에 따른 지반반력  $p$ 의 변화를  $p-y$  곡선으로 모형화하는 것이 합리적이다. 본 연구의 토사층에 대한  $p-y$  곡선은 API에서 제시한 설계지침을 적용하였다. 암반에 설치된 말뚝(또는 천공말뚝)의  $p-y$  곡선은 Reese & Nyman<sup>8)</sup>이 제시한 곡선과 공내재하시험(PMT) 결과를 통하여 도출한 곡선을 이용하였다.

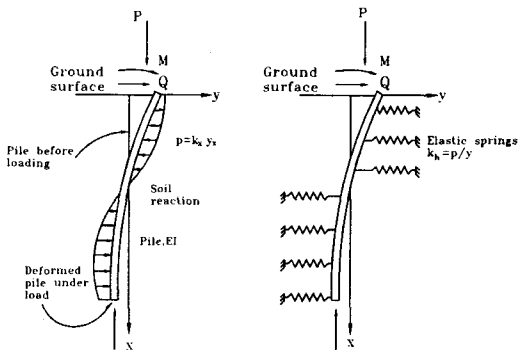


Fig. 4 Subgrade reaction model for lateral force-resisting pile

### 2.3 지반-돌핀구조계의 운동방정식

계류돌핀구조와 같이 비교적 얇은 바다에 고정되는 구조물이, 큰 외력을 받는 경우, 기초를 포함한 주변 지반의 강성에 민감한 거동을 보인다. 특히 큰 파고조건에서는 변형이 크게 발생하여, 하중-변위관계가 비선형거동을 보일 수 있으므로, 이에 대한 고려가 반드시 필요하다.

계류돌핀구조물에 작용하는 외력 중에서 부유구조물의 운동에 의한 외력이 가장 지배적이라 할 수 있으므로, 본 연구에서는 계류돌핀 및 콘크리트블럭에 작용하는 파동력은 무시하였다. 이러한 경우에, 지반-돌핀구조계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$(\mathbf{M}_{str} + \mathbf{M}_a) \ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C}_{str} + \mathbf{C}_{hyd}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{r}(\mathbf{x}) = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \mathbf{f}_B(t) \quad (5)$$

위에서  $\mathbf{M}_{str}$ 은 지반-말뚝계 및 돌핀구조물에 대한 질량행렬이고,  $\mathbf{M}_a$ 은 돌핀구조물이 유체 내부에서 운동할 때 발생하는 추가적인 관성력을 고려하기 위한 부가질량행렬이고,  $\mathbf{C}_{str}$ 은 구조물 전체에 대한 감쇠행렬이며,  $\mathbf{C}_{hyd}$ 은 구조물이 유체내부에서 운동함으로 인하여 추가적으로 받게 되는 저항력을 고려하여주기 위한 감쇠행렬이다.  $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 는 지반의 복원력을 포함한 전체 구조물의 복원력 벡터이며,  $\mathbf{f}_B(t)$ 는 BMP 부유체 자체의 운동에 의한 외력으로, 외력이 전달되는 요소에만 작용한다. 그리고,  $\ddot{\mathbf{x}}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$ ,  $\mathbf{x}$ 는 각각 구조물의 가속도, 속도, 변위벡터이다.

### 3. 지반-말뚝계의 비선형거동특성을 고려한 돌핀계류구조물의 동적해석

본 연구에서는 식 (5)와 같이 주어진 비선형동적방정식을 가장 효과적인 수치적분알고리즘의 하나로 알려진 Newmark  $\beta$  방법<sup>9)</sup>을 사용하여 해석하였으며, 이때, 적분상수로는  $\beta=0.25$ ,  $\gamma=0.5$ 를 사용하여 해의 안정성과 수렴성을 확보하였다.

식 (5)의 지반-돌핀구조계의 지배방정식을 modified Newton-Raphson 방법을 사용하여 다음

과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}_i^{t+\Delta t} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}_i^{t+\Delta t} + \mathbf{K} \Delta \mathbf{x}_i^{t+\Delta t} \\ = \mathbf{f}^{t+\Delta t} - \mathbf{r}_{i-1}^{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\mathbf{M}$  은 구조물의 질량 및 부가질량의 합이고,  $\mathbf{C}$  는 구조물의 감쇠 및 유체에 의한 감쇠의 합이며,  $\mathbf{K}$  는 구조물 및 지반의 초기강성이다. 그리고,  $\mathbf{f}^{t+\Delta t}$  는  $t+\Delta t$  시점에서의 부유구조물에 의해 작용하는 외력이고,  $\mathbf{r}_{i-1}^{t+\Delta t}$  는  $t+\Delta t$  시점에서  $i-1$  번 반복계산에서 구하여진 전체구조물의 복원력을 의미한다. 윗첨자  $t+\Delta t$  는 시간을 의미하고, 아랫첨자  $i$  는 해당시간에 대한 비선형해석의 반복계산횟수이다. 변위, 속도, 가속도 사이에 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\mathbf{x}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{x}_{i-1}^{t+\Delta t} + \Delta \mathbf{x}_i^{t+\Delta t} \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{x}^t + \frac{\Delta t}{2} (\dot{\mathbf{x}}^t + \dot{\mathbf{x}}_i^{t+\Delta t}) \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_i^{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{x}}^t + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\mathbf{x}}^t + \ddot{\mathbf{x}}_i^{t+\Delta t}) \quad (9)$$

식 (6)~(9)를 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{K}} \Delta \mathbf{x}_i^{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{f}} \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{K}} = \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{K} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{M} \left\{ \frac{4}{\Delta t} (\mathbf{x}^t - \mathbf{x}_{i-1}^{t+\Delta t}) + \frac{4}{\Delta t} \dot{\mathbf{x}}^t + \ddot{\mathbf{x}}^t \right\} \\ + \mathbf{C} \left\{ \frac{2}{\Delta t} (\mathbf{x}^t - \mathbf{x}_{i-1}^{t+\Delta t}) + \dot{\mathbf{x}}^t \right\} \\ + \mathbf{f}^{t+\Delta t} - \mathbf{r}_{i-1}^{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (10)~(12)를 이용하여, 비선형방정식에 대한 직접수치적분을 수행할 수 있다.

#### 4. 예제해석

##### 4.1 예제구조물 및 작용하중

본 예제해석에서는 현재 예비설계된 BMP의 계류돌핀구조계를 대상으로 동적해석을 수행하였다.

해상 소각 및 담수화를 위한 BMP는 거제도 삼성중공업 인근 해상에 설치될 예정에 있으며, 부유구조물은 가로, 세로, 높이가 각각 30m, 22m, 2m의 직육면체의 형상을 가지고 있다. 다음의 Fig. 5는 예비설계된 BMP의 치수 및 위치를 보여주고 있는 평면도이다.

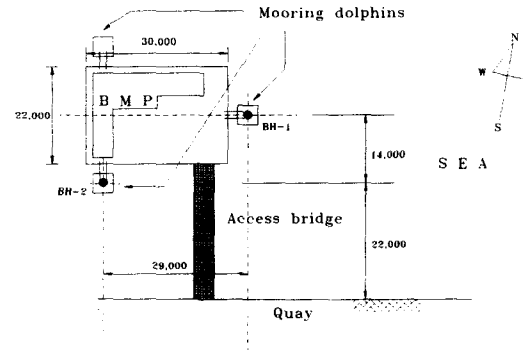


Fig. 5 Preliminary design of BMP

거제도 연안의 설치해역에서의 환경조건은 다음과 같다. 수심은 10m~15m, 설계풍속은 40m/sec, 조류는 1노트 이내이며, 100년 유의파고는 0.58m, 주기는 3.37sec로 조사되었다. 위의 그림과 같이 현재 계획중인 계류돌핀구조물은 총 3기로써 부유구조물을 계류하고 있다. 계류돌핀구조물은 위치에 관계없이 일정한 형태로 설계되었으며, 돌핀구조물 1기당 4개의 1200mm 강관파일로 구성되어 있다.

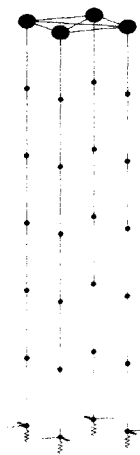


Table 1 Geometric & Material Properties

파일상부	5m x 5m x 2m 콘크리트구조물 밀도 23 ton/m <sup>3</sup> 총질량 115 ton	
파일	돌핀 1기당 4개의 파일을 사용	
	외경	12 m
	두께	16 mm
	항복응력	260 MPa
	허용응력	130 MPa
	탄성계수	200 GPa
	포와송비	0.3
감쇠비	1차모드 3% 2차모드 10%	
단위길이당 무게	467.26 kg/m	

Fig. 6 Dolphin model

계류돌핀구조물에 대한 상세한 치수 및 재원은 다음의 Table 1 및 Fig. 6과 같다. 일반적인 강구조물의 경우, 첫 번째 모드의 감쇠비는 2~3%를 사용하며, 두 번째 모드의 감쇠비는 5~10%를 사용하는데, 본 예제에서는 감쇠를 크게 고려하여 첫 번째 모드와 두 번째 모드에 대한 감쇠비를 3%와 10%로 고려하였다.

파일의 길이 및 해저지표면 아래의 지반-말뚝계의 거동특성은 다음의 2절에 기술한 예제해석에 따라 달리 결정되었으므로, 각 절에서 설명하기로 한다. 계류돌핀구조물에 작용하는 외력으로는 첫째, BMP 본체의 운동으로부터 전달되는 외력, 둘째, 돌핀상부에 작용하는 파동력, 셋째, 파일에 작용하는 파동력으로 구분할 수 있다. 이러한 외력 중 BMP 본체의 운동으로부터 전달되는 외력이 가장 지배적이며, 이는 충격완충장치인 펜더와 케이블을 통하여 계류돌핀구조물에 전달된다. 계류돌핀구조물에 직접 작용하는 파동력은 본 연구에서는 고려하지 않았으며, 이에 대해서는 추후 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

펜더 및 케이블을 통하여 돌핀상부에 전달되는 외력은 다음과 같이 평가하였다. 최대외력은 펜더에 의하여 전달되며, 돌핀 1기당 100톤으로 결정되었다. 이는 BMP의 크기(가로x세로x높이 : 22m x 30m x 2m)와 설계풍속 40m/sec, 유의파고 0.58m, 파주기 3.37sec<sup>1)</sup> 등을 고려하여 BMP의 surge, yaw, heave 운동의 최대변위<sup>1)</sup>를 결정하고, 그 변위에 해당하는 펜더의 변형량과 반력을 이용하여 산정된 값이다. 한편, 케이블로부터 전달되는 최대외력은 펜더에 비하여 40% 수준으로 평가하여 40ton으로 산정하였다.

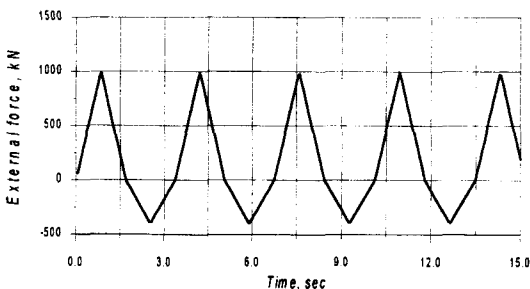


Fig. 7 Exciting force on pile cap of dolphin

펜더와 케이블로부터 전달되는 외력은 Fig. 7과 같이 삼각파의 형태를 가지는 것으로 고려하였는데, 이와 유사한 연구에서 대부분 외력의 형태를 SINE파를 고려하거나 혹은 충격력에 대하여 충격하중으로 고려하는 것과는 차이가 있다. 만약 부유체로부터 직접적인 충격에 의하여 계류돌핀구조가 응답하게 된다면, 그 경우에는 삼각파 형태보다는 오히려 짧은 시간의 충격력과 부유체의 운동주기의 반에 해당하는 시간까지의 일정한 크기의 힘이 작용하게 되어 충격하중과 사각파로 고려하는 것이 실제적인 것이다. 그러나, 본 연구의 대상 구조물인 계류돌핀구조물의 경우, 부유체의 운동으로 인한 충격력은 충격완충장치인 펜더를 통하여 주어지게 되고, 따라서, 펜더가 수축하는 동안 천천히 외력을 받게 되며, 이는 하중입력시간에 대하여 선형적으로 크기가 증가하는 것으로 고려할 수 있다. 한편, 펜더가 완전히 수축되고 난 후 다시 복원되는데, 이 때도 역시 일시에 외력이 없어지는 것이 아니라, 서서히 복원되므로 선형적으로 크기가 감소하는 것으로 고려할 수 있다. 따라서, 펜더로부터 전달되는 외력은 삼각파의 형태로 고려하는 것이 합리적이다. 케이블의 경우는 펜더와는 다른 양상으로 하중을 전달하게 되겠지만, 본 연구에서는 케이블을 통하여 전달되는 외력은 펜더와 같은 형태를 갖고, 크기만 작은 것으로 고려하였다.

#### 4.2 토사지층의 경우

토사지층에 설치되는 BMP 돌핀계류구조물에 대한 동적해석을 위하여 거제도 연안의 해저지반에서의 지반조사결과를 이용하였다. 표준관입시험결과만이 수행되어 이를 바탕으로 사질토층의 마찰각 및 스프링계수와 점토의 비배수 전단강도를 보수적으로 산정하였으며, 나머지 계수들은 통상적인 값을 적용하였다. 이 경우 값이에 따른 지반정수는 다음의 Table 2와 같이 산정되었다.

Table 2 Soil properties of field test area in Kojé Island

깊이	지층	N치	지반정수
10-13m	사질토층	15	$\delta = 20^\circ$ $\phi = 30^\circ$ $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$
13-17m	점토층	20이하	$c_u = 20 \text{ kPa}$ $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$
17-25m		30이하	$c_u = 50 \text{ kPa}$ $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$
25m-	풍화토층	-	-

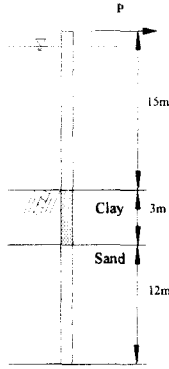


Fig. 8 Soil profile

말뚝의 Young 계수는  $E = 2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 이며, 말뚝의 관입깊이는 해저지표면으로부터 15m인 경우를 고려하였다. 이 때 주어진 말뚝의 길이에 대하여 강관말뚝의 지름은 1200mm이고, 두께는 40mm로 지반상부의 강관파일보다 두껍게 설정하였다. 유한차분해석한 결과, 해저지표면에서의 규명된 지반-말뚝계의 거동특성은 Fig. 9와 같다<sup>12)</sup>.

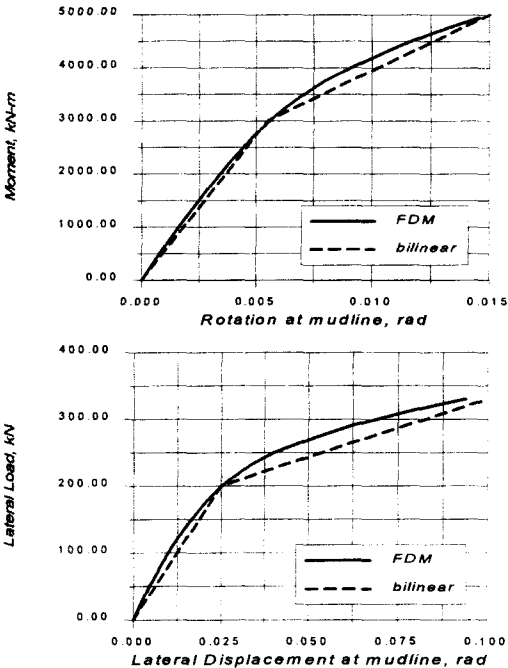


Fig 9. Equivalent load-displacement relationship at mudline for field test area of Kojé Island

위의 Fig. 9는 깊이에 따른 지반강성을 고려하여 지반-말뚝계에 대한 유한차분 해석결과와 그 결과를 이중선형관계(Bi-linear)로 단순화시킨 것이며, 본 연구에서는 이중선형관계를 이용하여 동적해석을 수행하였다. 토사지층에 설치된 계류돌핀구조물의 파일 상부에서의 변위응답은 Fig. 10과 같다. 강제기초로 고려한 경우 최대변위는 +0.074m, -0.040m이며, 선형탄성지반으로 가정한 경우 최대변위는 +0.133m, -0.055m, 그리고 비선형특성을 고려한 경우 최대변위는 +0.154m, -0.057m이다. 즉, 강제기초로 해석한 결과에 비하여 선형동적해석을 수행한 결과는 1.5배 이상, 그리고, 비선형동적해석을 수행한 결과는 2.0배 이상의 응답이 구하여짐을 알 수 있다. 선형동적해석을 수행한 결과와 비선형동적해석을 수행한 결과에서 진폭을 비교하면 선형동적해석결과 진폭은 0.188m, 비선형동적해석결과 진폭은 0.211m로 10% 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고, 비선형해석결과 (+) 방향으로 더 큰 응답을 보이는 것은 해저지표면의 등가스프링요소에서의 초기항복으로 인하여 잔류변형이 존재하기 때문이다.

Fig. 11에서는 각각 해저지표면(Fig. 11-a)과 상단위치(Fig. 11-b)에서의 돌핀, 즉 강관파일에 작용하는 휨모멘트를 나타낸 그림이다. 파일상부에서의 변위가 지반-말뚝계를 선형 또는 비선형으로 고려한 경우, 최대휨모멘트는  $2.0 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 로 산정되었으며, 이는 강제기초로 고려한 경우의 최대휨모멘트인  $2.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 보다 40% 정도 작은 값이다. 지반-말뚝계의 거동특성을 고려하는 경우 해저지표면 위치에서의 파일에 작용하는 휨모멘트가 작게 산정되는 것은 기초에서의 변형을 허용하기 때문에, 저항할 수 있는 휨모멘트가 파일의 다른 한쪽으로 전달되었기 때문이다. 이를 Fig. 11-b를 통하여 확인할 수 있다. 파일상단에서의 최대휨모멘트는 선형해석 또는 비선형해석을 통하여  $2.3 \sim 2.4 \text{ MN} \cdot \text{m}$ , 강제기초로 고려한 경우  $2.2 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 로 해석되었으며, 파일상단에 작용하는 최대휨모멘트는 지반-말뚝계의 거동을 고려하는 경우 5~10% 더 크게 산정함을 알 수 있다. 강제기초로 고려한 경우, 해저지표면에서 최대휨모멘트가 작용하는 반면, 지반-말뚝

계의 거동을 고려하는 경우 파일상단에 최대휨모멘트가 작용함을 알 수 있다.

다음의 표는 토사지층에 설치된 BMP 계류돌핀 구조물의 상단변위, 해저지표면 및 상단에서의 최대휨모멘트를 정리한 결과이다.

Table 3 Maximum displacement and bending moments of pile

foundation type	최대변위응답		최대휨모멘트			
	상단		상단		해저지표면	
	(+)방향	(-)방향	(+)방향	(-)방향	(+)방향	(-)방향
Nonlinear foundation	0.154	-0.057	$1.18 \times 10^6$	$-2.31 \times 10^6$	$1.02 \times 10^6$	$-1.98 \times 10^6$
Linear foundation	0.133	-0.055	$0.99 \times 10^6$	$-2.39 \times 10^6$	$0.84 \times 10^6$	$-2.04 \times 10^6$
Rigid foundation	0.074	-0.040	$1.18 \times 10^6$	$-2.21 \times 10^6$	$1.50 \times 10^6$	$-2.78 \times 10^6$

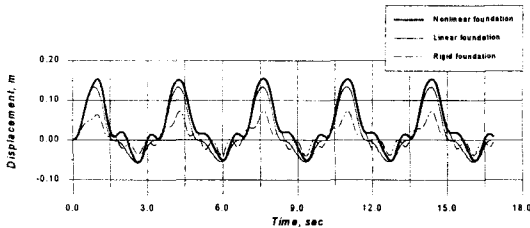
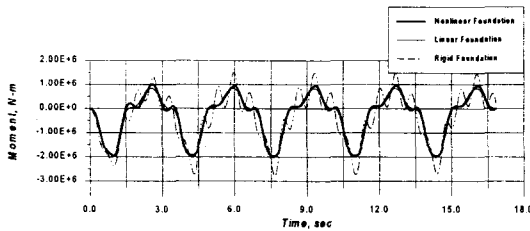
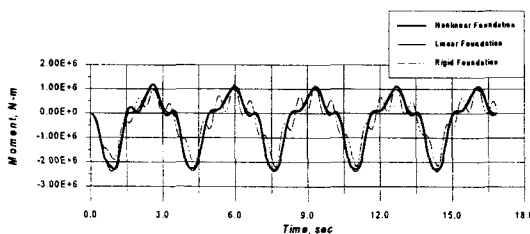


Fig. 10 Horizontal displacement of pile cap for external force



(a) at mudline



(b) at top connection

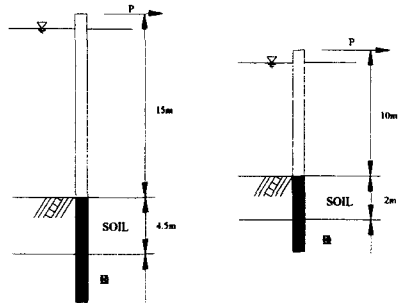
Fig. 11 Bending moment of pile

### 4.3 암반지층의 경우

BMP가 설치될 지점이 암반지층인 경우에 대한 돌핀계류구조물의 동적해석을 위하여 BMP Lab의 설치가 고려되고 있는 거제도 삼성중공업 인근 해상에서의 지반조사결과를 이용하였다.<sup>11)</sup> 지반조사는 계류돌핀이 시공될 위치를 고려하여 4.1절의 Fig. 5에 나타난 바와 같이 2개소에서 실시하였고 표준관입시험과 암석 코어 채취, 암석 일축압축시험, 공내수평재하시험(pressuremeter test) 등을 수행하였다. 수심은 BH-1이 14-14.5m이고 BH-2가 9.8m로 조사되었다.

조사결과를 보면 현장지반은 상부퇴적층과 기반암층으로 크게 나눌 수 있었고, 상부퇴적층이 조사지역의 최상층에 2m ~ 4m 정도 존재하고, 기반암층은 하부의 깊은 두께로 존재하며, 풍화를 거의 받지 않는 상태로 대체로 신선한 상태이며, 부분적으로 절리와 균열이 발견되었다. 시험결과로부터 분석한 각 층의 재료계수는 다음의 Table 4, 5와 같이 구할 수 있다.<sup>10)</sup>

지반에 관입할 천공말뚝이 지름과 관입깊이에 따른 거동에 대한 모델을 BH-1과 BH-2에 대하여 그림과 같이 설정하였다. 이때, 말뚝의 두부는 실제로는 콘크리트블럭에 의하여 회전변형이 제한되지만, 본 예제에서는 Fig. 12와 같이 회전이 자유로운 조건으로 고려하여 보수적으로 해석하였다. 말뚝은 지름이 1200mm인 경우에 대하여 해석하였으며, 말뚝의 길이는 해저지표면으로부터 충분히 길게 하여 단면에 작용하는 하중 및 발생하는 변위로부터 소요되는 관입깊이를 결정하도록 하였다. Fig. 13은 지반조사결과를 이용하여, 말뚝두부에서의 수평, 회전변위에 대한 하중-변위 관계를 구한 것이다.



(a) at BH1 site (b) at BH2 site

Fig. 12 Dolphin model



Table 4 Material properties of soil deposits

유효단위중량 $\gamma'$	흙마찰각 $\phi'$	말뚝흙마찰각 $\delta$	주면마찰 저지력계수 $K$	횡하중 스프링계수 $k$	정지토압계수 $K_0$
9 $kN/m^3$	30	20	0.8	8145 $kN/m^3$	0.4

Table 5 Material properties of rock

구분	일축압축강도 $q_u$	단위중량	Young계수 (일축압축시험)	Young계수 (PMT)	Poisson비 $\nu$
BH-1	80 MPa	2.7 $kN/m^3$	20 GPa	10 GPa	0.25
BH-2	50 MPa				

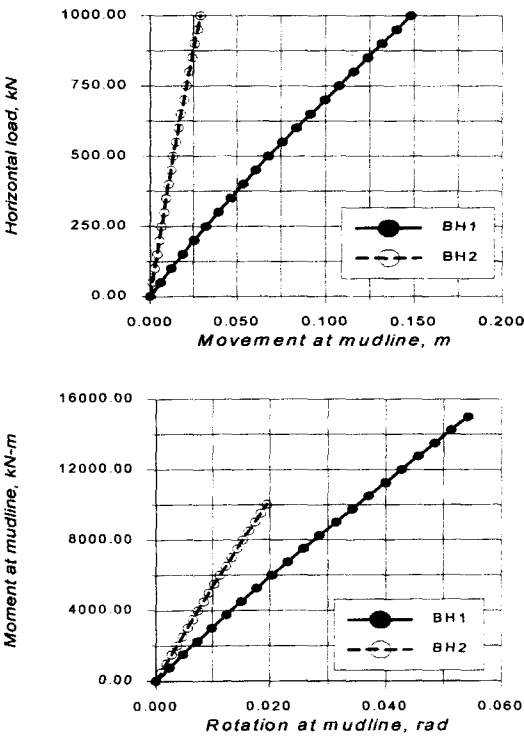
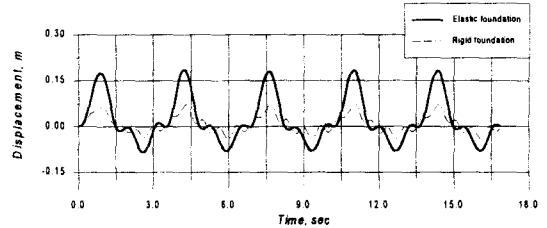


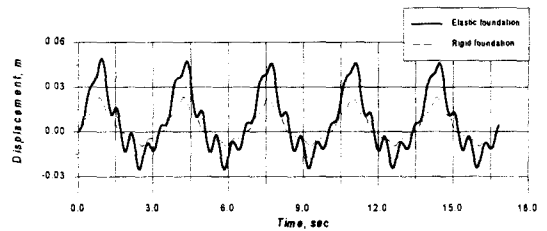
Fig. 13 Equivalent load-displacement relationship at mudline for BMP Lab site foundation

위의 지반-말뚝계의 거동특성을 살펴보면, 암반의 특성으로 인하여 비선형특성이 거의 없음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 위의 관계를 선형

으로 단순화하여, 지반-말뚝계의 해저지표면에서의 회전강성 및 수평강성을 구하였다. 다음의 Fig. 14는 지반-말뚝계를 강체, 선형모델, 및 비선형모델로 가정한 경우의 파일상부의 응답을 보인다.



a) at BH1 site



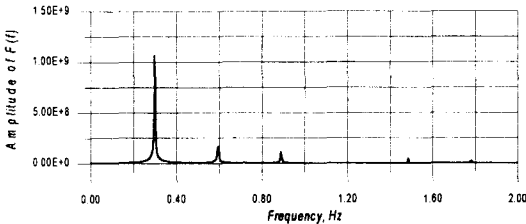
b) at BH2 site

Fig. 14 Horizontal displacement of pile cap for external force

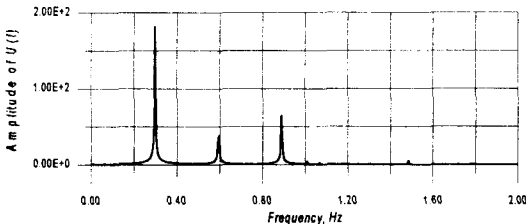
BH1의 경우 수심이 15m로 수심 10m의 BH2보다 깊기 때문에, 같은 외력 100톤에 대하여 모멘트를 더 많이 받게 되고, 또한 파일의 길이가 BH2보다 길기 때문에 더 많은 변형이 발생하게 된다. BH1의 경우 지반-말뚝계의 거동특성을 선형적으로 고려한 경우 최대변위는 0.185m로 강체기초로 고려한 경우의 0.074m보다 2.5배 이상 크게 산정되었으며, BH2의 경우 선형적으로 고려한 경우 최대 변위는 0.049m로 강체기초로 고려한 경우의 0.023m보다 2배 이상 크게 산정되었다.

위의 Fig. 14-a와 14-b의 변위응답특성을 주파수영역에서 살펴보기 위하여 다음의 Fig. 15와 같이 외력 및 BH1과 BH2에서의 파일상부의 변위응답결과를 FFT 결과를 이용하여 분석하였다. Fig. 15-a는 외력에 대한 FFT 결과이며, 15-b와 15-c는 각각 BH1에서의 변위응답, BH2에서의 변위응

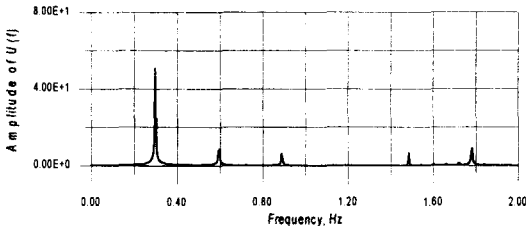
답에 대한 FFT 결과이다. FFT 결과를 이용하여 가진력의 주파수성분, 변위응답의 주파수성분, 가진력에 대한 변위응답의 동적확대계수 등을 계산할 수 있다. 먼저, 구조물의 첫 번째 모드의 공진주파수를 살펴보면, 지반-말뚝계의 거동을 고려한 BH1의 경우에는  $f_1 = 1.08\text{Hz}$  이며, BH2의 경우에는  $f_1 = 2.04\text{Hz}$  임을 알 수 있다. 한편, 가진력은  $f = 0.30\text{Hz}$ ,  $0.60\text{Hz}$ ,  $0.89\text{Hz}$ ,  $1.48\text{Hz}$ ,  $1.78\text{Hz}$  등의 주요 주파수성분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서, BH1의 경우에는 가진력의 두 번째, 세 번째 주파수성분의 영향이 상대적으로 크게 작용하고 있으며, BH2의 경우에는 가진력의 네 번째, 다섯 번째 주파수성분의 영향이 상대적으로 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.



a) FFT result of external force



b) FFT result of top displacement at BH1 site



c) FFT result of top displacement at BH2 site

Fig. 15 Fourier analysis results of external force and top displacements

다음의 Fig. 16과 17은 각각 BH1과 BH2의 지반을 대상으로 주어진 외력에 대하여 해저지표면과 파일상단에서의 휨모멘트의 시간에 따른 크기를 나타낸 것이다. 강체기초로 가정하고 해석한 경우, 해저지표면에서의 최대휨모멘트는 BH1에서  $2.8\text{MN}\cdot\text{m}$ , BH2에서는  $1.7\text{MN}\cdot\text{m}$ 로 산정되었으며, 지반-말뚝계의 거동을 선형적으로 고려한 경우의 최대휨모멘트는 BH1에서  $2.0\text{MN}\cdot\text{m}$ , BH2에서는  $1.4\text{MN}\cdot\text{m}$ 로 산정되었다. 토사지층의 경우와 마찬가지로 지반-말뚝계의 거동을 선형적으로 고려한 경우, 최대휨모멘트는 강체기초로 가정한 경우보다 BH1에서는 40%이상, BH2에서는 20%이상 작게 산정하고 있다. 이는 지반-말뚝계의 거동을 고려한 경우, 외력의 의한 모멘트는 파일의 양 끝의 강성이 서로 다름으로 인하여 모멘트분배가 균등하게 이루어지지 않고, 강성이 큰 콘크리트상부블럭-파일 접합부에 더 많은 모멘트가 분배되었기 때문이다. 이를 파일상단에서의 최대휨모멘트를 비교함으로써 확인할 수 있다. 파일상단에서 지반-말뚝계의 거동을 선형적으로 고려한 경우의 최대휨모멘트는 BH1에서  $3.0\text{MN}\cdot\text{m}$ , BH2에서  $1.8\text{MN}\cdot\text{m}$ 로 강체기초로 고려한 경우의 BH1에서 최대휨모멘트  $2.2\text{MN}\cdot\text{m}$ , BH2에서 최대휨모멘트  $1.4\text{MN}\cdot\text{m}$  보다 BH1에서는 35% 이상 크게, 그리고 BH2에서는 25% 이상 크게 산정되었다.

다음의 Table 6은 BH1과 BH2에서의 파일상단에서의 최대변위응답, 해저지표면 및 파일상단에서의 최대휨모멘트를 정리한 결과이다.

Table 6 Maximum displacement and bending moment of pile

Location	foundation type	최대변위응답		최대휨모멘트			
		상단		상단		해저지표면	
		(+)방향	(-)방향	(+)방향	(-)방향	(+)방향	(-)방향
BH1	Linear foundation	0.185	-0.084	$1.37 \times 10^6$	$-3.02 \times 10^6$	$0.90 \times 10^6$	$-1.96 \times 10^6$
	Rigid foundation	0.074	-0.040	$1.18 \times 10^6$	$-2.21 \times 10^6$	$1.50 \times 10^6$	$-2.78 \times 10^6$
BH2	Linear foundation	0.049	-0.025	$0.94 \times 10^6$	$-1.83 \times 10^6$	$0.70 \times 10^6$	$-1.36 \times 10^6$
	Rigid foundation	0.023	-0.010	$0.57 \times 10^6$	$-1.38 \times 10^6$	$0.72 \times 10^6$	$-1.74 \times 10^6$

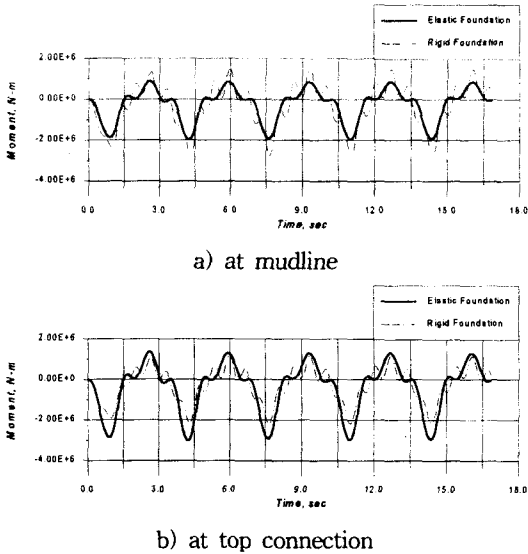


Fig. 16 Bending moment of pile at BH1 site

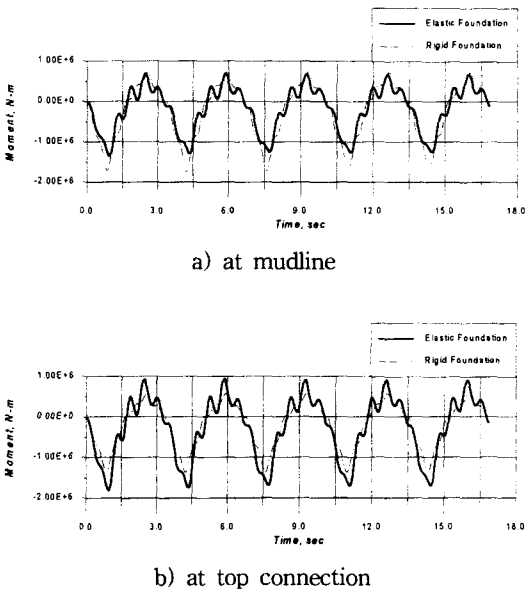


Fig. 17 Bending moment of pile at BH2 site

### 5. 결 론

본 연구에서는 지반-말뚝계의 거동특성을 고려한 지반-돌핀구조계의 동적해석을 수행하였다. 이

를 위하여 지반-말뚝계의 거동특성을 유한차분법을 이용하여 산정하고, 그 결과를 이용하여 수평, 수직, 회전자유도에 대한 등가스프링의 비선형강성을 추정하였으며, 이를 말뚝두부(해저지표면)에 등가치환하였다. 연약지반 혹은 지반의 특성으로 인하여 비선형거동특성이 큰 경우의 동적해석을 위하여 비선형해법의 일종인 modified Newton-Raphson 방법을 이용하였으며, 수치적분을 위하여 Newmark  $\beta$  방법에 사용하였다.

현재 연구가 진행중인 BMP 구조물의 계류돌핀 구조물을 대상으로 토사층이 깊은 토사지층과 암반지층의 경우에 대하여 동적해석을 수행한 결과, 암반지층의 경우 비선형거동특성이 거의 없기 때문에 비선형동적해석을 수행할 필요가 없었지만, 토사층이 깊은 토사지층의 경우 비선형거동특성으로 인하여 선형동적해석과 비선형동적해석의 결과가 파일상부의 최대응답의 경우 15% 이상 발생하기 때문에 지반-말뚝계의 비선형거동특성을 고려한 해석을 수행하여야 함을 알 수 있었다.

또한, 계류돌핀구조물의 설계에 있어 지반-말뚝계의 거동특성을 무시하는 경우, 모멘트분배 효과를 적절히 고려하지 못하게 되고, 이로 인하여 파일상부, 즉 콘크리트블럭과 파일의 연결부에서의 모멘트를 과소평가하게 된다. 따라서, 지반-말뚝계의 거동특성을 고려하여 계류돌핀구조물을 해석하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국기계연구원으로부터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 표한다.

### 참고문헌

1. 한국기계연구원, "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발," 2차년도 중간연구결과 발표회 발표자료, 1997
2. Thompson, J.M.T., Bokaian, A.R., and Ghaffari, R., "Subharmonic and Chaotic Motions of Compliant Offshore Structures and Articulated Mooring Tower," Journal of

- Resources Technology, Vol. 106, 1984
3. Toresch, Armin W., "Modeling Issues Associated with Nonlinear Dynamics of Mooring Systems," OMAE-Vol. 1, Nonlinear Dynamics of Marine Vehicles, ASME, 1993
  4. 메가플로트기술연구조합, "초대형부체식해양구조물 평성7년도 연구결과보고서", 1996
  5. 오세봉, 이진학, 김동수, 정태영, 이상순, "계류식 돌핀구조물에 대한 지반-말뚝계의 비선형 지반반력해석", 한국지반공학회지, 논문심사중, 1998
  6. American Petroleum Institute, "Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platform-Working Stress Design," API recommended practice 2A-WSD (RP2A-WSD), 12th Edition
  7. Reese, L.C. & O'Neill, M.W., "Drilled Shaft Construction Procedures and Design Methods, Design Manual," U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1987
  8. Reese & Nyman, "Field Load Tests of Instrumented Drilled Shafts at Islamorado Florida," Girdler Foundation and Exploration Corporation, 1978
  9. Bathe, K.J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
  10. 한국기계연구원, "지반-돌핀시스템의 충격하중에 대한 거동해법연구", 위탁연구보고서, 1997
  11. 동아지질, "해상 담수/소각 복합 파일럿 플랜트 개발사업 관련 지반조사 보고서", 1997
  12. 동아지질, "LBA 강제치장 안벽공사 및 의장안벽공사에 따른 지반조사 보고서", 1993