

SPM의 동적해석 S/W 개발

이문성 * · 김진석 * · 조철희 ** · 홍성근 *** · 정광식 ***

Development of SPM Dynamic Analysis Software

Mun-Seong Lee * · Jin-Seok Kim * · Chul H. Jo ** · Sung-Guen Hong *** · Kwang-Sic Chung *

KEY WORDS: SPM System (일점계류시스템), Circulating Water Channel (회류수조), Mooring (계류)

ABSTRACT: *The mooring system has been widely applied to secure marine vessels and offshore floating structures. configuration are different from environmental conditions and design concept of structures. The behavior of moored struc complex and dependent on various factors. It is required to confirm the stability of floating and mooring structures. Rec many advantages, FPSO system has become a popular floating and mooring structure in offshore oil and gas fields. component of FPSO is SPM system which allows varning motion w. r. t. external loadings; wind, wave and current. Sinc of SPM system is very complicated, the dynamic motion analysis is conducted with program. This paper introduce a se SMAP (Single Point Mooring Analysis Program) which was developed to analysis SPM motion under various external loa case results are compared with a commercial program called MORA to verify its accuracy. The software provides a easy o familar graphic and handy data interface.*

1. 서 론

계류 장치는 선박뿐만 아니라 오일 채취 및 생산 장비, 간 교, 다리 등을 포함한 부유구조물의 광범위한 분야에 일시적 또는 지속적 계류를 가능케 한다. 때문에 많은 계류 장치들이 사용되는데 설치 지역의 해양 환경 조건과 지형 조건 등에 따라 계류 장치의 기능과 모양이 달라진다. 적용 해역에 가장 적합한 시스템을 선택하고 그에 따른 계류라인의 특성을 결정하기 위하여 설계단계에서부터 여러 가지 조건이 고려되어야 한다(Roger, 1985).

최근 활발한 해양개발로 대형 부유구조물등이 많이 설치되고 있다. 특히 해양에서 원유 및 가스를 채취하고, 가공하고, 저장 및 하역(offloading) 할 수 있는 FPSO가 많이 이용되고 있다. FPSO의 핵심부분은 SPM 시스템이다. SPM 시스템은 FPSO가 외력에 대해 자유롭게 선회할 수 있도록 하는 핵심 부분이다. SPM 시스템의 운동은 부유체, 계류 형태 및 종류, 환경 하중에 따라 복합적으로 나타난다. 이로 인해 SPM 시스템의 운동해석은 프로그램을 사용하여 수행한다.

본 연구에서는 계류 해석 프로그램인 SMAP(Single point Mooring Analysis Program)을 개발하여 SPM 시스템의 운동을 해석하였다.

본 프로그램의 신뢰성을 위해 현재 계류 시스템 해석에 사용되는 MORA 프로그램과 그 결과를 비교하였다. 프로그램은 편리하게 사용할 수 있도록 최근의 윈도우 메뉴방식을 선택하였으며, 외력에 대한 각 계류라인의 변위, 장력 그리고 부유체의 변위 등을 그림으로 알 수 있게 구성하였다.

2. 프로그램 구성

2.1 기능

프로그램은 SPM시스템의 계류라인 해석을 위해 기본적으로 catenary 이론에 기초하여 각 계류라인의 장력과 수평변위를 계산하여 외부 영향 하중인자에 의한 계류시스템의 응답 상황을 예측한다. 특정한 외력과 지역조건하에서 시스템이 설치되어 운영되기 위한 기초 설계 및 평가 자료로서 SPM 시스템의 계류라인 힘-변위관계 해석은 매우 중요하다(Berteaux, 1976). 해양에 앵커링으로 고정된 평형상태의 SPM시스템이 수평방향으로 외력에 의해 발생하는 위치변화를 시뮬레이션한다. 해석결과는 설계시 필요한 시스템의 계류라인의 특성치를 결정하거나 시스템의 안정성을 분석할 수 있는 자료가 된다.

2.2 해석 절차

입력되는 외부 하중은 바람, 파도, 조류의 세 하중을 포함하며 그 지역의 수심과 사용되는 계류선의 특성치들을 입력하게 되고 부이 및 시스템의 제원에 대하여 외력 하중이 계류라인에 전달되어 시스템의 전체적 거동을 예측하게 된다. 부이의

* (주) 메카 정보통신
** 인하대학교
*** 인하대학교 대학원

equilibrium

형태는 원형과 사각형으로 선택되어 질 수 있으며 제원은 그림을 보면서 입력이 가능하다.

프로그램에서 입력받는 자료는 계류라인의 수, 계류 펼침 각도, 바람, 파도, 조류의 속도, 계류라인의 특성과 SPM 시스템의 제원등이며 입력받은 자료들을 바탕으로 특정 환경하에서 주어진 모델에 작용하는 총저항과 작용 방향을 구하고, 각 계류라인의 장력 및 수평변위를 계산한다.

3. 해석 및 계산과정

3.1 적용조건

- 외력
 - Wave : Stoke's fifth theory
 - Current : Wave theory with summation to wave velocity
 - Wind : API rule
- 운동방정식
 - Added mass coef.
 - Damping coef.
 - Spring coef.
- Catenary equation for multi-leg mooring

3.2 해석이론

3.2.1 외 력

(1) Wave

Wave force를 계산하는데 있어서 drag force가 중요하게 작용할 경우는 고차 방정식을 사용하여야 한다. 따라서 여기서는 Stoke's fifth theory를 사용하였다.

(2) Current

Current의 속도는 wave의 속도와 합쳐져 wave theory에 적용되었다.

(3) Wind

Wind force는 API식을 따랐다.

3.2.2 운동 방정식

최대 외력을 계산하는 과정은 운동방정식에 따랐다. 운동방정식은 다음의 세 가지 계수를 고려하여 계산하였다 (Mino, 1989).

- Added mass coef.
- Damping coef.
- Spring coef.

3.2.3 Multi-leg mooring 해석

(1) 기본조건

- Basic catenary equation : equation of static

- Heavy and short cables
- 계류사의 dynamic effect는 무시
- Stiffness of elasticity & geometry

(2) 가정

- 해저면은 편평하고 안정적이다.
- 계류사의 spring stiffness는 무시한다.
- 힘의 작용방향은 x축 방향으로 환산한다.
- 부이는 pretension에 의해 첫 번째 안정적 상태가 된다.
- 최대 외력은 부이의 수평변위에 영향을 미친다.
- 부이 뒤쪽의 계류사들은 외력의 저항으로 작용한다.
- 각 계류사의 각도는 최대 외력에 의해 결정된다.
- 최대 외력은 각 계류사들의 각도에 따라 분산된다.
- Catenary equation을 계산하는 각 단계에서 다음의 두 가지 상태가 중요한 조건이 된다.
 - minimum angle of anchor point
 - minimum percent ratio of the horizontal length of mooring line on seabed

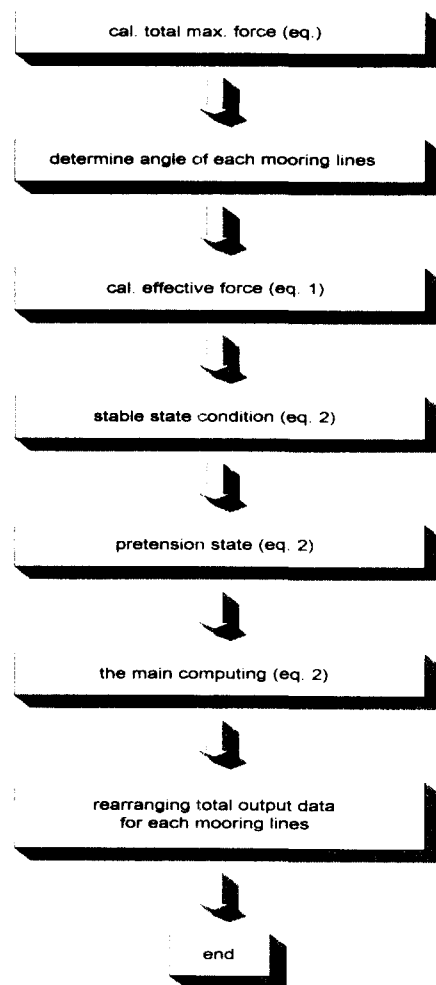


Fig. 1 Flow chart

(3) 각 계류선의 각도 결정

각 계류선의 각도는 total maximum force로부터 반시계 방향으로 결정된다.

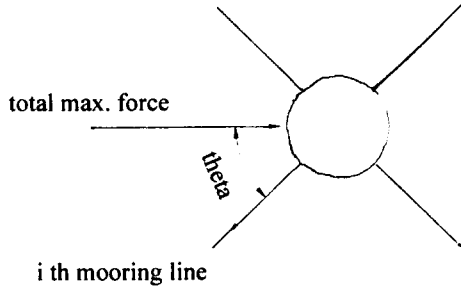


Fig. 2 Max. force direction

(4) Effective force 의 계산

부이 뒤쪽의 계류선들은 total maximum force의 반대방향으로 저항으로 작용한다.

$$H_{eff} = C_{11} \times (H_{Total} - C_k \cdot R_k) \quad (1)$$

- H_{eff} : Effective force
- C_{11} : Corrective coef. of force (default : 1.35)
- H_{Total} : Total max. force
- C_k : Corrective coef. of resistance (default : 0.1)
- $\sum_{k=1}^m R_k$: Total resistance

$$R_k = W_{sub} \times h \times \cos(\text{angle } k)$$

- R_k : Resistance of k th mooring line ($k = 1, 2, \dots, m$)
- m : Mooring line number of the rear of buoy
- W_{sub} : Sub. weight of mooring line
- h : Water depth
- $\text{angle } k$: Each angle of mooring lines of the rear of buoy

(5) Basic equation

$$S = \frac{H}{W_{sub}} \times \sinh\left(\frac{W_{sub} \cdot x}{H}\right) = h \times \sqrt{1 + \frac{2H}{W_{sub} \times h}} \quad (2)$$

$$x = \frac{H}{W_{sub}} \times \sinh^{-1}\left(\frac{s \cdot W_{sub}}{H}\right)$$

$$T = H + W_{sub} \times h = \sqrt{H^2 + W_{sub}^2 \times s^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{W_{sub} \cdot s}{H}\right)$$

$$x_f = L - S$$

$$X = x + x_f$$

$$\text{excursion} = |X' - X|$$

- X' : Hor. length in another case
- θ : Angle of mooring line to total max. force direction
- W_{sub} : Sub. weight of mooring line
- A : Anchor point
- B : Touchdown point
- h : Water depth
- T : Tension in mooring line
- H : Hor. Force
- x_f : Hor. length of mooring line on seabed
- x : Hor. length of suspended line
- X : Hor. length between anchor point and center of buoy
- α : Angle at anchor point
- δ : Angle at buoy in attach point of mooring line
- s : Suspended length of mooring line
- L : Total length of each mooring lines

(6) 안정 상태

안정 상태는 외력이 작용하지 않는 이상적인 상태이다. 따라서, 식 (2)로부터

$$H=0$$

이 상태는 모든 계산의 기본적인 상태이다.

(7) Pretension state

Pretension state는 원하는 위치에 부이를 고정시키기 위해 winch나 tensioner를 이용하여 초기에 인위적인 장력을 주는 상태이다. 이 상태는 모든 계산의 기본적인 데이터를 제공한다.

식(2)로부터,

$$H = H_{pre}$$

(8) 주요 계산

이 계산들은 모든 계산에서 가장 중요한 계산들로서 기하학적으로 다음 두 부분으로 나뉘어 계산된다.

- 부이 앞쪽 부분
- 부이 뒤쪽 부분

1) 부이 앞쪽 부분

이 과정에는 외력이 적용된다. 최대 외력은 각 계류선으로 분산된다. 분산된 힘들은 부이의 앞쪽 계류선에만 작용한다. 각각의 수평력은 계류선의 각도에 따라 각 계류선들로 나뉘어진다.

따라서, 식 (2)로부터,

$$H = H_{eff} \times |\cos(\text{angle } i)| \quad (3)$$

계산된 값들은 대칭의 위치에 있는 다른 계류사의 최종 결과값과 비슷한 값을 가진다. 부이의 최종 수평 변위는 이 과정에서 계산된다.

2) 부이 뒤쪽 부분

부이 뒤쪽 부분의 계류사들은 최대 외력의 반대방향으로 저항효과를 나타낸다. 따라서 이 과정은 최종 수평변위에 의해 계산된다.

식(2)에 의해,

$$\text{Total excursion} = |X' - X| \quad (4)$$

이 계산방법은 부이의 앞쪽부분 계산과 반대이다. 여기서 계산되는 항목들은 부이의 앞쪽부분과 같지만 모든 계산방법은 반대이다(Faltinsen, 1990).

(9) Output data의 재정렬

모든 output data들은 계산과정에 따라 순서대로 배열된다. 따라서 이 data들은 계류사의 순서에 따라 다시 배열되어야 한다.

4. 화면구성

SMAP의 주요 화면 구성을 Fig. 3서부터 7에 나타내었다. 처음 부이 자료를 입력하는 화면과, 계류사 사양, 각도, 위치, 외력 및 환경조건을 입력하는 화면이 있다. 물론 전혀 맞지 않거나 환경조건과 외력조건이 이룬 범위를 벗어나면 경고가 화면에 나타난다. 또한 계류사 사양을 입력할 경우 관련사양을 화면에 불러내어 참고할 수 있게 하였다. 기본적인 데이터가 입력되면 1차 계산을 하여 평형상태를 보여준다. 이후 외력을 계산하고, pretension을 고려하여 2차 계산을 하여 외력이 작용하였을 때 부이의 변위 및 계류사의 장력, 변위등을 계산하여 그림 및 도표로 나타낸다.

Fig. 3에 보인바와 같이 barge 모델과 cylindrical 모델중 해석하고자 하는 모델 형태를 선택할 수 있다. Fig. 4에 나타난 부이 모델링 화면에서는 기존 상용프로그램들의 복잡한 모델링 절차를 보다 간결하고 명확하게 표현하여 더욱 빠르고 정확한 모델링이 가능하도록 하였다. 완성된 부이 모델은 Fig. 5에 나타난 화면처럼 계류사와 함께 보여지게 되는데 사용자가 원하는 attachment point를 마우스로 클릭하고 나면 계류사의 펼침각도를 입력할 수 있고 각각의 계류사에 대해 수정이 자유롭도록 프로그램 되었다. Fig. 6은 최종 수평변위를 나타내는데 과도에 따른 scale화된 모델의 수평이동모습이 동영상으로 처리되었으며 각 계류사에 대한 suspended length, horizontal force, tension의 그래프화된 결과치를 해당 항목을 선택함으로써 볼 수 있다. 그래프는 2차원과 3차원 구현이 모두 가능하며 이중 suspended length에 대한 3차원 그래프 화면을 Fig. 7에 나타내었다. 그래프는 줌기능을 통해 확대, 축소가 가능하고 출력할 수 있도록 프로그램화 되었다.

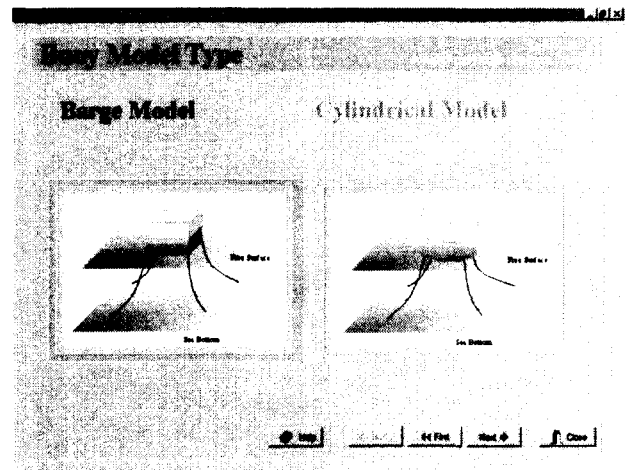


Fig. 3 부이 model type 결정

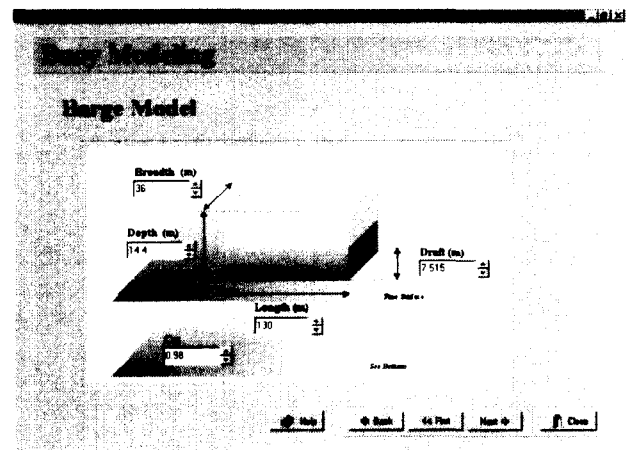


Fig. 4 부이 모델링

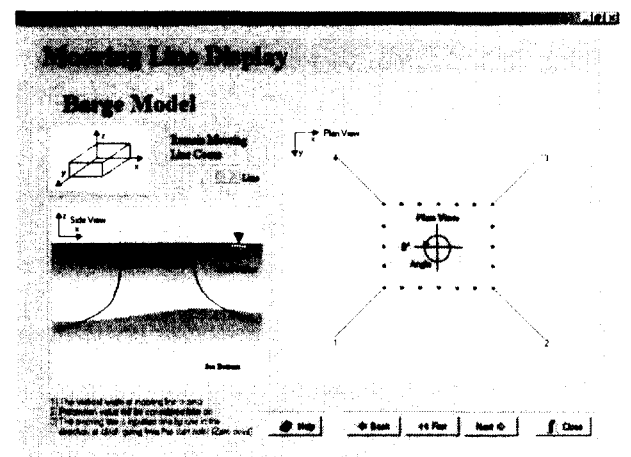


Fig. 5 계류사 display

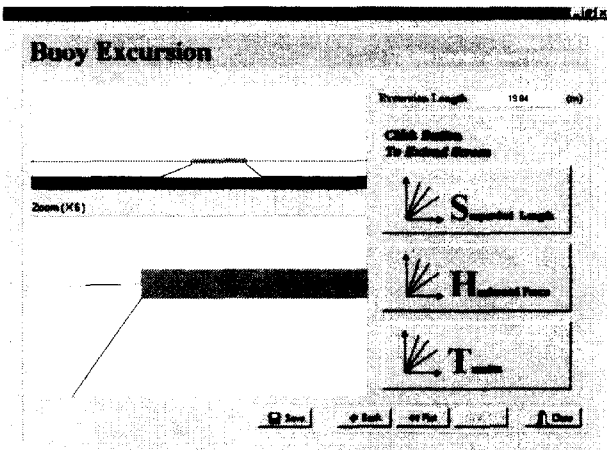


Fig. 6 부이의 최종 수평변위

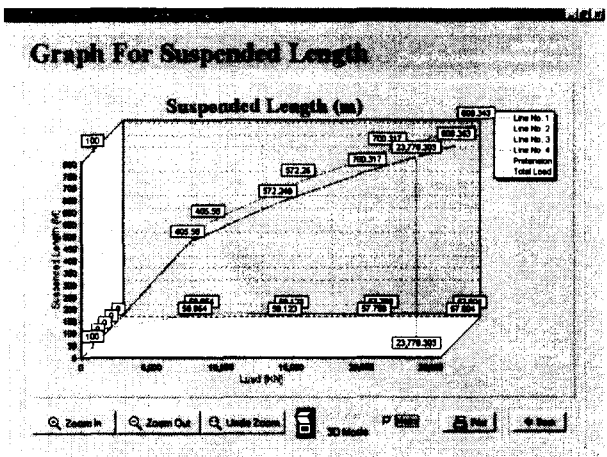


Fig. 7 결과값에 대한 3차원 그래프

5. 프로그램 해석 결과 비교/ 검토

SPM시스템의 실험결과(조철희, 1999)와 계류해석 프로그램인 MORA를 이용하여 몇 가지 경우의 해석 결과를 SMAP의 해석결과와 비교해 봄으로써 SMAP의 신뢰성을 검증하였다. 해석은 상사법칙에 의해 실험모델과 환경하중을 실제로 확장하여 행하여 졌다. 여기서 계류사의 각도는 최대 외력의 작용선과 계류사가 이루는 각도를 말하며 barge와 cylindrical 모델에 대해 각각 35°와 45°의 경우를 비교 분석하였다.

5.1 Barge 모델

Scale factor를 120으로 하여 해석이 이루어진 모델의 실선 확장 제원은 Table 1과 같고 적용된 환경하중조건에 대한 계류사의 각도별 수평변위비교는 Fig. 8, Fig. 9 와 같다.

Table 1 Barge모델의 실선확장 제원

항 목	단 위	실 선
Length	m	130
Breadth	m	36
Height	m	14.4
Draft	m	7.515
C _b		0.98
Scale Factor		120

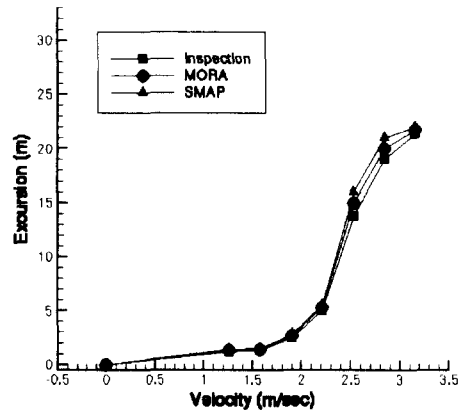


Fig. 8 Barge모델의 35° 일 경우 실선 수평변위 비교

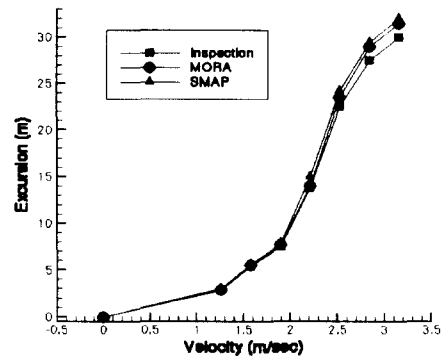


Fig. 9 Barge모델의 45° 일 경우 실선 수평변위 비교

Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 바지 모델일 경우 세 가지 경우 모두 일치되는 결과를 보여준다. 기존에 사용되는 MORA결과 및 실험치의 오차는 10%이내이다.

5.2 Cylindrical 모델

Scale factor를 40으로 하여 해석이 이루어진 모델의 실선 확장 제원은 Table 2와 같고 적용된 환경하중조건에 대한 Cylindrical 부이의 각도별 수평변위비교는 Fig. 10 ~Fig. 13 과 같다.

Table 2 Cylindrical 모델의 실선확장 제원

항 목	단 위	Case I	Case II
부이 O.D	m	12	12
Height	m	6	12
Draft	m	2.8	8.0
C _b		0.98	0.98
Scale Factor		40	40

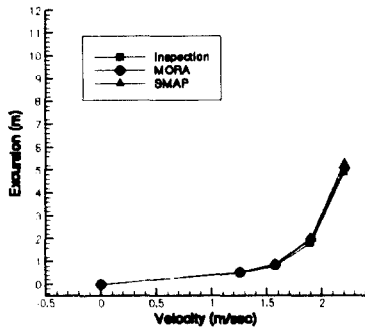


Fig. 10 Case I 모델의 35° 일 경우 실선 수평변위 비교

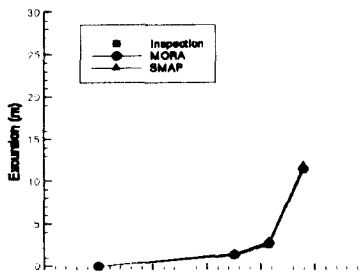


Fig. 11 Case II 모델의 35° 일 경우 실선 수평변위 비교

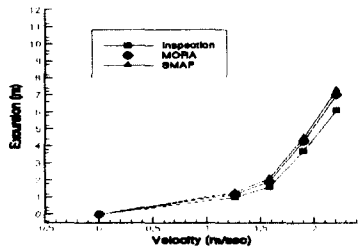


Fig. 12 Case I 모델의 45° 일 경우 실선 수평변위 비교

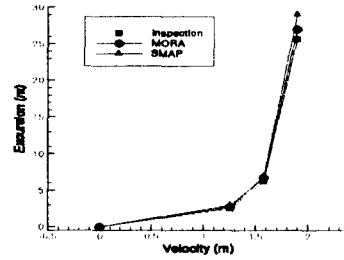


Fig. 13 Case II 모델의 45° 일 경우 실선 수평변위 비교

Fig. 10부터 13에서와 같이 실린더 모델일 경우 세 가지 경우 모두 일치되는 결과를 보여준다. 기존에 사용되는 MORA 결과 및 실험치의 오차는 10% 이내이다. 오차의 원인은 실험실에서의 외력조건과 기존 프로그램의 외력 적용이론의 차이 등에서 발생한 것이라 생각된다. 또한 경계조건 및 평형조건을 입력하고 정의하는 알고리즘의 차이가 결과의 오차를 발생한 것이라 생각된다.

6. 결 론

이 연구를 통해 개발된 SMAP는 계류되어 있는 부이의 최대 변위 및 계류사의 장력과 최대 변위등을 예측하는데 사용될 수 있다. 기존의 프로그램보다 여러 가지 보완되어 자료의 입력, 해석, 결과 검토등이 사용자의 편의성을 고려하여 개발되었다. 해석 결과도 그림 및 도표로 표시하여 쉽게 여러 가지 경우를 빠른 시간 내에 검토가 가능하도록 하였다. 본 프로그램의 결과를 다른 프로그램결과 및 실험 결과와 비교하여 신뢰성을 증명하였다. 앞으로 SMAP이 SPM 설계나 계류 연구를 위해 널리 사용될 수 있기를 기대하며, 여러 가지 기능을 필요하다면 추가할 예정이다.

참 고 문 헌

Roger Maari(1985). "Single Point Mooring", An SBM INC. Publication, pp 13~18
 H.O. Berteaux(1976). "Buoy Engineering", John Wiley & Sons, pp 97~191.
 Minoos H. Patel(1989). "Dynamics of Offshore Structures", Butterworths
 O.M. Faltinsen(1990). "Sea Load on Ships and Offshore Structures", University of Cambridge, vol. 1, pp 247~258.
 John B. Herbich(1996). "Handbook of Coastal and Ocean Engineering", Vol. 2
 조철희, 홍충유, 정택선(1999). "SPM 시스템 계류라인의 정적 해석 소프트웨어 개발 연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 202~207